ISSN 0335-3931

normalisation française

XP ENV 1993-1-3
Décembre 1999

Indice de classement : **P 22-313**

ICS : 91.080.10

Construction métallique

Eurocode 3 «Calcul des structures en acier» et Document d'Application Nationale

Partie 1-3 : Règles générales — Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid

E : Steel construction — Eurocode 3 «Design of steel structures» and National Application Document — Part 1-3 : General rules — Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting
D : Stahlkonstruktion — Eurocode 3 «Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten» und Nationale Anwendungsdokumente — Teil 1-3 : Allgemeine Regeln Ergänzende Regeln für Kalgeformte dünnwandige Bauteile und Blech

Norme expérimentale

publiée par AFNOR en décembre 1999.

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être adressées à l'AFNOR avant le 30 septembre 2001.



Correspondance Le présent document reproduit intégralement la prénorme européenne ENV 1993-1-3:1998 et intègre les adaptations nationales relatives à cette ENV.

Analyse Le présent document contient des règles détaillées, supplémentaires à celles de la norme XP ENV 1993-1-1 qui s'appliquent aux structures en acier comprenant des profilés et plaques à parois minces formés à froid.

Descripteurs **Thésaurus International Technique :** construction métallique, acier de construction, profilé métallique, plaque métallique, formage à froid, calcul, caractéristique, durabilité, assemblage, résistance des matériaux.

Modifications

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55

  1er tirage 99-12

Commission de Normalisation de la Construction Métallique

BNCM CNCMET

Membres de la commission de normalisation

Président : M BROZZETTI

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA
M	BARAKA	CTICM
M	BARJON	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANIQUES
M	BAZIN	CSTB
M	BORGEOT	CTICM
M	BRAHAM	ASTRON BUILDING SYSTEMS
M	BROZZETTI	CTICM
M	CAMPAN	EUROPROFIL France
M	CHABROLIN	CTICM
M	CRETON	BNS
M	DESFERTILLES	INSTITUT DE SOUDURE
MME	DUSSAUGEY	SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES D'EQUIPEMENT
M	ESTEVE	EDF
M	ETIENNE	M.E.L.T. / D.A.E.I.
MME	FERNANDEZ	AFNOR
M	GALEA	CTICM
M	GAULIARD	SYNDICAT DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE DE FRANCE
M	GOURMELON	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	GREGOIRE	CETEN APAVE
M	GRIMAULT	TUBEUROP FRANCE
M	KRUPPA	CTICM
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	LE ROUX	EDF
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MAYERE	BUREAU VERITAS
M	MOREAU	SNPPA
M	MOUTY	
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERFETTI	C.S.N.E.
M	PESCATORE	BNCM
M	RAOUL	SETRA
M	ROCHE	SETRA
M	RYAN	CTICM
M	SOKOL	PAB
M	VOISIN	INRS

Ont participé en tant qu'experts au groupe de travail EC3 partie 1-3/DAN :

Animateur : M CRETON

Secrétariat : BNS

M	ANTROPIUS	MONOPANEL
M	BARAKA	CTICM
M	CHABAS	MONOPANEL
M	FEHRENBACHER	HAIRONVILLE SA
M	GREGOIRE	CETEN APAVE
M	IZABEL	CETEN APAVE
M	LAPEYRE	CEP
M	MAGNIEZ	PAB
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MAYERE	BUREAU VERITAS
M	MILLOT	CABINET JAILLET-ROUBY
M	MONTAGNER	TECTONIA
M	MOREAU	SNPPA
M	MUNIER	PROFIL DU FUTUR
M	RENIER	SADEF
M	ROOSE	SADEF
M	SOKOL	PAB

Avant-propos national à l'ENV 1993-1-3 (Eurocode 3 — Partie 1-3)

AP.1 Introduction

Le présent document, dénommé EC3-1.3 DAN, reproduit intégralement l'ENV 1993-1-3 (en clair l'Eurocode 3 partie 1-3, en abrégé l'EC3-1.3), -y compris son corrigendum : ENV 1993-1-3/AC- approuvé par le Comité Européen de Normalisation (CEN) en tant que prénorme européenne (ENV).

Le présent document spécifie, en outre, les adaptations nationales qui ont été apportées à l'EC3-1.3 dont la réunion constitue le Document d'Application Nationale (en abrégé le DAN).

Les parties de l'EC3-1.3 que le DAN n'invalide pas et les différents segments du DAN forment le présent document qui transpose l'EC3-1.3.

AP.2 Présentation générale de l'EC3-1.3 DAN

AP.2.1 Les objectifs de l'EC3-1.3 DAN

L'EC3-1.3 DAN répond à plusieurs objectifs :

a) À la demande du CEN, produire à l'intention des pays francophones la version française *in extenso* de l'EC3-1.3, incluant le corrigendum.

b) Présenter les adaptations nationales qui sont apportées à l'EC3-1.3 et qui, pour une part, apportent des éclaircissements pour l'application de ce dernier pendant la phase d'expérimentation, et pour une autre part, préfigurent les observations que présentera la France quand il sera question de conférer à l'EC3-1.3 le statut de norme européenne (EN).

c) Préciser les valeurs des coefficients de sécurité qu'il incombe aux autorités de chaque État membre de fixer (voir clause (13) de l'avant-propos), en amendant éventuellement les valeurs encadrées dans l'EC3-1.3.

d) Recenser les textes normatifs auxquels se réfère le présent document et préciser les modalités d'application des normes ou règlements nationaux de référence dès lors que ceux-ci sont particuliers au cadre de l'EC3-1.3.

e) Apporter aux maîtres d'ouvrages, publics et privés, les éléments d'une norme de conception et de justification des structures qui soient contractualisables en application notamment de la Directive 71/305/CEE (incluant ses amendements) sur la coordination des procédures de marchés publics de travaux et de la Directive 89/106/CEE relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres concernant les produits de construction.

AP.2.2 Les différentes lectures de EC3-1.3 DAN

La matérialisation de ces différents objectifs permet de produire dans un document unique trois textes bien distincts moyennant les lectures différenciées ci-après :

a) Le présent document transposant l'EC3-1.3 est compris dans tout ce qui n'est pas grisé.

b) Le DAN est délimité par les zones encadrées qui sont indexées «I», «A» ou «C», et intègre aussi les valeurs encadrées de l'EC3-1.3 qui n'ont pas été invalidées.

c) La traduction française de la version originale de l'EC3-1.3 est donc à trouver dans tout ce qui n'est pas à la fois encadré et indexé, zones grisées incluses.

AP.2.3 Le statut prescriptif des adaptations nationales

Un statut prescriptif est attribué à chacune des adaptations nationales (voir tableau AP.1).

Tableau AP.1 : Statuts prescriptifs des adaptations nationales

Statut de l'adaptation	Conception de représentation du statut
PRINCIPE	Écriture droite Caractère normal
RÈGLE D'APPLICATION	Écriture italique Caractère normal
COMMENTAIRE	Écriture droite Petit caractère

La portée d'une adaptation nationale vis-à-vis de la spécification européenne à laquelle elle se rapporte, a été également codifiée (voir tableau AP.2).

Tableau AP.2 : Portée des adaptations nationales

Catégorie d'adaptation	Codification de l'adaptation
INVALIDATION	I avec grisé de la partie de la prescription de l'EC3-1.3 invalidée
AMENDEMENT	A
COMMENTAIRE	C

AP.2.4 Les textes normatifs de référence

Le répertoire des normes et autres textes normatifs de référence à l'EC 3-1.3 DAN est donné à l'article AP.4 de cet avant-propos.

AP.3 Modalités d'application

AP.3.1 Domaine d'application

Le domaine d'application de l'EC3-1.3 DAN couvre la construction des bâtiments et ouvrages de génie civil en acier comprenant des profilés et plaques à parois minces formés à froid.

Pour les applications à la marge de ce domaine, il est recommandé de consulter la Commission de Normalisation de la Construction Métallique (CNCMét).

AP.3.2 La référence aux textes normatifs

Dans les répertoires de l'article AP.4 du présent avant-propos sont présentés :

— partie gauche : les normes européennes actuellement en vigueur ou en projet ;

— partie droite et en regard des normes européennes en projet, les normes nationales et autres documents s'y substituant temporairement et à utiliser, en totalité ou partiellement avec le présent document.

La date prévisionnelle de publication des futures normes européennes est donnée à titre indicatif apportant ainsi un aperçu sur la consistance et sur le rythme de développement de l'ensemble.

Dans le cadre de l'application du présent document, on se référera aux normes répertoriées dans la partie droite de l'article AP.4. En l'absence de normes européennes, il est fait appel, pour l'essentiel aux normes nationales. Il n'a pas été jugé nécessaire, chaque fois que l'EC3-1.3 fait référence à une norme (européenne ou ISO) de mentionner dans le corps même du DAN, la (les) norme(s) nationale(s) équivalente(s). À charge pour l'utilisateur de retrouver celle(s)-ci dans l'article AP.4 par une lecture allant de la gauche vers la droite.

AP.3.3 Modalités contractuelles

Le présent document n'est applicable, en totalité ou en partie, dans le cadre contractuel d'un marché public ou privé que s'il y est fait explicitement référence :

— pour les marchés publics, dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières à l'article 2 — où la liste des pièces générales rendues contractuelles mentionnera le présent document et en cas d'utilisation partielle les parties de celle-ci à considérer — et à l'article 10 — qui indiquera la dérogation correspondante faite au Cahier des Clauses Techniques Générales —.

— pour les marchés privés, dans des documents particuliers du marché tels que définis dans la norme NF P 03-001, septembre 1991 (Cahier des Clauses Administratives Particulières, Cahier des Clauses Spéciales, Cahier des Clauses Techniques Particulières).

AP.3.4 Modalités d'expérimentation

L'ENV 1993-1-3 a été approuvé par le CEN le 4 juin 1993.

Au terme d'une période expérimentale de trois ans, les pays membres du CEN auront à opter soit pour un ultime prolongement du statut de l'ENV pour une période d'au moins trois ans, soit pour le statut de norme européenne (EN).

Cette décision sera très certainement assortie d'une révision de la norme.

Dans cette perspective, les utilisateurs du présent document sont invités à faire connaître leurs observations avec, si possible, propositions d'amendements à l'appui, à l'AFNOR (Tour Europe — Cedex 7 — 92049 PARIS LA DÉFENSE) qui transmettra au BNCM.

Évolution des adaptations nationales

Il n'est pas exclu que l'expérimentation de l'EC3-1.3 DAN mette en évidence certains problèmes relatifs à l'applicabilité du document, conduisant la CNCMét à formuler des amendements ou à apporter des compléments jugés indispensables aux adaptations nationales déjà produites. En cas de difficulté, il y aura lieu de se rapprocher de l'AFNOR ou du BNCM.

AP.4 Liste des normes et textes normatifs de référence

Le présent article a pour objet de donner la liste des normes et autres textes normatifs auxquels il y a lieu de se référer pendant la phase d'expérimentation de l'EC3-1.3 DAN.

Normes européennes ou internationales publiées ou en préparation			Normes pouvant êtres appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Date cible publication	Désignation	Intitulé
EN 10002-1	Matériaux métalliques — Essai de traction — Partie 1 : Méthode d'essai (à température ambiante)	Publiée 03/1990	NF EN 10002-1	Matériaux métalliques — Essai de traction Partie 1 : Méthode d'essai (à température ambiante)
EN 10025	Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés — Conditions techniques de livraison	Publiée 08/1993	NF EN 10025	Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés — Conditions techniques de livraison
EN 10113-2	Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins — Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant	Publiée 09/1992	NF EN 10113-2	Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins — Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant
EN 10113-3	Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins — Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique	Publiée 09/1992	NF EN 10113-3	Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins — Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique
EN 10143	Tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud — Tolérances sur les dimensions et la forme	Publiée 01/1993	NF EN 10143	Tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud — Tolérances sur les dimensions et la forme
EN 10147	Tôles et bandes en aciers de construction galvanisées à chaud en continu — Conditions techniques de livraison	Publiée 06/1995	NF EN 10147	Tôles et bandes en aciers de construction galvanisées à chaud en continu — Conditions techniques de livraison
			P 34-301	Tôles et bandes en acier de construction galvanisées prélaquées et revêtues d'un film organique calandré destinées au bâtiment — Classification et essais
			P 34-310	Tôles et bandes en acier de construction galvanisées à chaud en continu destinées au bâtiment — Classification et essais
			NF EN 10214	Bandes et tôles en acier revêtues à chaud en continu d'alliage zinc-aluminium (ZA) — Conditions techniques de livraison
			NF EN 10215	Bandes et tôles d'acier revêtues d'alliage aluminium-zinc (AZ) à chaud en continu — Conditions techniques de livraison

Normes européennes ou internationales publiées ou en préparation			Normes pouvant êtres appliquées avec l'ENV	
Désignation	**Intitulé**	**Date cible publication**	**Désignation**	**Intitulé**
EN 10149-2	Produits plats laminés chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique	Publiée 06/1995	NF EN 10149-2	Produits plats laminés chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique
EN 10149-3	Produits plats laminés chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant	Publiée 09/1995	NF EN 10149-3	Produits plats laminés chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant
EN 10155	Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique — Conditions techniques de livraison	Publiée 09/1993	NF EN 10155	Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique — Conditions techniques de livraison
ENV 1090-2	Exécution des structures en acier — Partie 2 : Règles pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid	12/1998	DTU 32-1	Construction métallique — Charpente en acier
			NF P 34-205-1	Couverture en plaques nervurées issues de tôles d'acier revêtues — Partie 1 : Cahier des clauses techniques (référence DTU 40.35)
			NF P 84-206-1	Mise en œuvre des toitures en tôles d'acier nervurées avec revêtement d'étanchéité — Partie 1 : Cahier des clauses techniques (référence DTU 43.3)
ENV 1991-1	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — Partie 1 : Bases du calcul	Publiée 10/1994	XP ENV 1991-1	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 1 : Bases de calcul
ENV 1993-1-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments	Publiée 12/1992	P 22-311	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
ENV 1994-1-1	Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier — béton — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments	Publiée 10/1992	P 22-391	Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier — béton et document d'application nationale — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

Normes européennes ou internationales publiées ou en préparation			Normes pouvant êtres appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Date cible publication	Désignation	Intitulé
ISO 1000	Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités	Publiée 1992	NF X 02-006	Le système international d'unités — Descriptions et règles d'emploi — Choix de multiples et de sous-multiples
			X 02-004	Normes et symboles des unités de mesures du système international d'unités (SI)
ISO 4997	Tôles en acier de construction laminées à froid			
			NF P 34-503	Plaques profilées en tôles d'acier revêtues ou non et panneaux — Essais de flexion sous charges linéaires et/ou sous charges concentrées
			XP P 30-310	Détermination de la résistance caractéristique d'assemblage — Méthode d'essai d'arrachement des fixations en sommet d'onde ou de mesure de leur support
			XP P 30-312	Détermination de la caractérisation à la flexion — Méthode conventionnelle d'essai de flexion des vis autoperceuses et autotaraudeuses de longueur supérieure ou égale à 70 mm
			XP P 30-313	Détermination de la résistance caractéristique d'assemblage — Méthodes d'essai d'arrachement des fixations de l'isolant ou du revêtement d'étanchéité sur l'élément porteur
			XP P 30-314	Détermination de la résistance caractéristique d'assemblage — Méthode d'essai de l'assemblage des plaques en tôles d'acier ou d'aluminium au support
			NF EN 10204	Produits métalliques — Types de documents de contrôle

PRÉNORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE VORNORM
EUROPEAN PRESTANDARD

ENV 1993-1-3

Mars 1998

ICS : 91.040.00 ; 91.080.10

Descripteurs : construction métallique, aciers de construction, formage à froid, plats, calcul, règles de calcul, résistance mécanique.

Version française

Construction métallique — Eurocode 3 «Calcul des structures en acier» — Partie 1-3 : Règles générales — Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid

Stahlkonstruktion — Eurocode 3 «Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten» — Teil 1-3 : Allgemeine Regeln — Ergänzende Regeln für Kalgeformte dünnwandige Bauteile und Blech

Steel construction — Eurocode 3 «Design of steel structures» — Part 1-3 : General rules — Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 4 juin 1993 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

Les membres du CEN sont tenus d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

Réf. n° ENV 1993-1-3:1998 F

Sommaire

Avant-propos

Le présent document a été préparé par le CEN /TC 250 "Eurocodes structuraux".

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus d'annoncer ce document : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

Objectifs des Eurocodes

(1) Les Eurocodes Structuraux regroupent un ensemble de normes pour le calcul structural et géotechnique des bâtiments et ouvrages de génie civil.

(2) Ils ne traitent de l'exécution et de l'inspection que dans la mesure où cela est nécessaire pour indiquer la qualité des produits de construction et le niveau de réalisation à satisfaire pour être conforme aux hypothèses adoptées dans les règles de calcul.

(3) Jusqu'à ce que l'ensemble des spécifications techniques harmonisées concernant les produits et les méthodes de contrôle de leurs performances soit disponible, certains Eurocodes Structuraux couvrent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme Eurocodes

(4) La Commission des Communautés Européennes (CCE) a amorcé l'élaboration d'un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil, destinées à être utilisées initialement comme alternative aux différentes règles en vigueur dans les différents Etats membres et à les remplacer à terme. Ces règles techniques reçurent alors le nom d'Eurocodes Structuraux.

(5) En 1990, après consultation de ses Etats membres, la CCE a transféré le travail de développement, de diffusion et de mise à jour ultérieures des Eurocodes Structuraux au CEN, et le Secrétariat de l'AELE a accepté de s'associer au travail du CEN.

(6) Le comité technique CEN/TC 250 est chargé de tous les Eurocodes Structuraux.

Programme des Eurocodes

(7) Les travaux sont en cours sur les Eurocodes Structuraux suivants, chacun d'eux comportant en général plusieurs parties :

EN 1991	Eurocode 1	Bases de calcul et actions sur les structures ;
EN 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton ;
EN 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier ;
EN 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier - béton ;
EN 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois ;
EN 1996	Eurocode 6	Calcul des structures en maçonnerie ;
EN 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique ;
EN 1998	Eurocode 8	Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes ;

EN 1999 Eurocode 9 Calcul des structures en alliage d'aluminium.

(8) Des sous-comités distincts ont été constitués par le CEN/TC 250 pour les différents Eurocodes mentionnés ci-dessus.

(9) La présente partie 1-3 de l'Eurocode 3 est publiée par le CEN en tant que prénorme européenne (ENV) pour une durée initiale de trois ans.

(10) La présente prénorme est destinée à une application expérimentale et à la soumission de commentaires.

(11) A l'issue d'une période de deux ans environ, les membres du CEN seront invités à formuler des commentaires officiels à prendre en compte pour la détermination des actions futures.

(12) Dans l'intervalle, il convient de transmettre les réactions et commentaires concernant la présente prénorme au Secrétariat du CEN/TC 250/SC 3 à l'adresse suivante :

BSI Standards
British Standards House
389 Chiswick High Road
London W4 4AL
England

ou à votre organisme national de normalisation.

Documents d'Application Nationale (DAN)

(13) Dans l'optique des responsabilités incombant aux autorités des Etats membres en matière de sécurité, santé et autres domaines couverts par les exigences essentielles de la Directive sur les Produits de Construction (DPC), certains éléments de sécurité figurant dans la présente ENV ont été affectés de valeurs indicatives qui sont identifiées par un encadrement ☐ ("valeurs encadrées"). Il appartient aux autorités de chaque Etat membre de revoir les valeurs encadrées, et elles ont la faculté de substituer des valeurs alternatives définitives pour ces éléments de sécurité en vue de l'application nationale.

(14) Certaines normes européennes ou internationales d'accompagnement peuvent ne pas être disponibles au moment de la publication de la présente prénorme. Il est donc prévu qu'un Document d'Application Nationale (DAN) donnant toutes valeurs définitives se substituant aux valeurs proposées pour les éléments de sécurité, mentionnant les normes d'accompagnement compatibles et contenant des directives sur l'application nationale de la présente prénorme, soit publié par chaque Etat membre ou son organisme de normalisation.

(15) Il est prévu que la présente prénorme soit utilisée conjointement avec le DAN en vigueur dans le pays où le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil est situé.

Spécificités de la présente prénorme

(16) Les parties de l'ENV 1993 dont la publication est actuellement envisagée sont les suivantes :

(16) **I** Les parties de l'ENV 1993 dont la publication a été actualisée à la date de publication de l'ENV 1993-1-3 + DAN sont les suivantes :

ENV 1993-1-1 Règles générales et règles pour les bâtiments ;

ENV 1993-1-2 Règles générales – calcul du comportement au feu ;

ENV 1993-1-3 Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid ;

ENV 1993-1-4 Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables ;

A ENV 1993-1-5 Règles supplémentaires pour les plaques planes raidies chargées dans leurs plans ;
A ENV 1993-1-6 Règles supplémentaires pour les coques ;

A ENV 1993-1-7	Règles supplémentaires pour les plaques planes raidies chargées hors de leurs plans ;
ENV 1993-2	**Ponts métalliques et structures en plaques;**
A ENV 1993-2	Ponts métalliques ;
ENV 1993-3	**Tours, mâts et cheminées ;**
A ENV 1993-3-1	Pylônes et mâts haubanés ;
A ENV 1993-3-2	Cheminées ;
ENV 1993-4	**Réservoirs, silos et pipelines ;**
A ENV 1993-4-1	Silos ;
A ENV 1993-4-2	Réservoirs ;
A ENV 1993-4-3	Pipelines ;
ENV 1993-5	Pieux et palplanches ;
ENV 1993-6	Chemins de roulement ;
ENV 1993-7	**Structures marines et maritimes ;**
ENV 1993-8	**Structures agricoles.**

(17) Le travail sur la présente partie 1-3 de l'Eurocode 3 a été commencé par la Commission des Communautés Européennes. Il a été effectué en collaboration avec un groupe de travail de la Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM) et un projet a été publié en 1990 sous l'intitulé de "Projet d'Eurocode 3 : Annexe A".

(18) Lorsque la responsabilité des Eurocodes Structuraux est passée au CEN, le comité technique CEN/TC 250, sous-comité CEN/TC 250/SC 3, a été chargé de terminer le présent document.

(19) Dans la présente partie 1-3 de l'Eurocode 3, on distingue trois classes de construction utilisant des profilés et des plaques à parois minces formés à froid. Les valeurs encadrées des coefficients partiels donnés dans la partie 1-3 constituent des valeurs recommandées pour la classe de construction I et la classe de construction II.

1 Généralités

1.1 Objet

(1)P La présente partie 1-3 de l'ENV 1993 traite du calcul de structures en acier comprenant des profilés et plaques à parois minces formés à froid. Elle contient des dispositions supplémentaires pour les structures comportant des produits en acier formés à froid à partir de tôles ou bandes d'acier laminées à chaud ou à froid, de faible épaisseur, revêtues ou non revêtues. Elle est destinée à être utilisée pour le calcul de bâtiments et d'ouvrages de génie civil conjointement avec l'ENV 1993-1-1.

(1) **A** La référence à l'ENV 1993-1-1 doit être comprise comme la référence au Document d'Application Nationale correspondant, à savoir la norme :

XP P 22-311 : Eurocode 3 "Calcul des structures en acier " et Document d'Application Nationale - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments,sauf indications contraires dans le texte.

NOTE L'exécution des structures en acier comprenant des profilés et des plaques à parois mince formés à froid est couverte par l'ENV 1090-2.

(NOTE) **C**	Bien que cette prénorme européenne ait été formellement approuvée, le texte de l'ENV 1090-2 en version française et les recommandations d'application nationale correspondantes ne sont pas disponibles à la date de publication du présent document ; on ne peut donc pas s'y référer. Selon la destination des ouvrages ou parties d'ouvrages, il y a lieu de se référer aux normes et documents nationaux en vigueur.

(2)P Elle donne des méthodes de détermination de la capacité portante et de l'aptitude au service pour des éléments et assemblages soumis à des charges essentiellement statiques. Ces méthodes de calcul s'appliquent aux profilés et plaques en acier formés à froid par des procédés tels que le profilage aux galets ou le pliage à la presse-plieuse. Elles sont également applicables au calcul en phase de coulage des tôles profilées en acier destinées aux dalles mixtes acier-béton, voir ENV 1994-1-1.

(2) **A**	La référence à l'ENV 1994-1-1 doit être comprise comme la référence au Document d'Application Nationale correspondant, à savoir la norme : XP P 22-391 : Eurocode 4 "Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton" et Document d'Application Nationale - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments". sauf indications contraires dans le texte.

(3)P Elle donne également des méthodes de calcul pour la conception des structures, tenant compte de la collaboration de paroi, en utilisant des plaques d'acier comme diaphragme.

(4)P La présente partie 1-3 de l'ENV 1993 donne des méthodes pour le dimensionnement par calcul et pour le dimensionnement assisté par des essais.

NOTE Dans le domaine des profilés et plaques formés à froid, on utilise couramment des produits de série pour lesquels le dimensionnement par calcul peut ne pas conduire à des solutions économiques, et il est donc souvent préférable d'utiliser le dimensionnement assisté par des essais. Des méthodes d'essais adaptées sont données dans l'annexe A.

(5) Les méthodes de dimensionnement par calcul ne s'appliquent que dans des gammes bien définies de caractéristiques de matériaux et de proportions géométriques pour lesquelles on dispose d'une expérience suffisante et d'une validation par essais. Ces limitations ne s'appliquent pas au dimensionnement assisté par des essais.

(6) La présente partie ne s'applique pas aux profils creux de construction formés à froid, pour lesquels il convient de se reporter à l'ENV 1993-1-1.

1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1)P Selon la nature de chaque paragraphe, une distinction est faite dans la présente partie entre principes et règles d'application.

(2)P Les principes comprennent :

- des énoncés généraux ou définitifs pour lesquels il n'existe aucune alternative ;

- des prescriptions et des modèles analytiques qui n'admettent aucune alternative, sauf mention contraire.

(3) Les principes sont identifiés par la lettre P suivant le numéro de paragraphe.

(4)P Les règles d'application sont en général des règles reconnues qui suivent les principes et qui satisfont à leurs prescriptions. On peut utiliser des règles de calcul alternatives différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition qu'il soit démontré que la règle alternative respecte les principes concernés et présente une fiabilité au moins identique.

(5) Dans la présente partie, les règles d'application sont identifiées par un numéro entre parenthèses, comme dans le présent paragraphe.

1.3 Références normatives

La présente prénorme européenne comporte, par référence datée ou non datée, des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de ces publications ne s'appliquent à la présente prénorme européenne que s'ils y sont incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

EN 10002 Matériaux métalliques - Essai de traction
Partie 1 : Méthode d'essai (à température ambiante)

EN 10025 Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés - Conditions techniques de livraison

EN 10113 Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins :
Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant
Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique

EN 10143 Tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud - Tolérances sur les dimensions et la forme

EN 10147 Tôles et bandes en aciers de construction galvanisées à chaud en continu - Conditions techniques de livraison

EN 10149 Produits plats laminés chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid
Partie 2 : Conditions de livraison pour les aciers obtenus par laminage thermomécanique
Partie 3 : Conditions de livraison pour les aciers à l'état normalisé / laminage normalisant

EN 10155 Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique -Conditions techniques de livraison

ENV 1090 Exécution des structures en acier
Partie 2 : Règles pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid

ENV 1991 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures
Partie 1 : Bases du calcul

ENV 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier
Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

ENV 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier - béton
Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

ISO 1000 Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités

ISO 4997 Tôles en acier de construction laminées à froid

1.4 Définitions

Pour les besoins de la présente partie 1-3 de l'ENV 1993, les définitions suivantes s'appliquent, en plus de celles contenues dans l'ENV 1993-1-1 :

1.4.1 matériau de base : Tôle d'acier à partir de laquelle les profilés et les plaques sont formés à froid.

1.4.2 limite d'élasticité de base : Limite d'élasticité en traction du matériau de base.

1.4.3 effet de diaphragme : Comportement structural faisant intervenir un effet de cisaillement dans le plan des plaques.

1.4.4 plateau : Tôle profilée raidie sur ses bords, conçue pour s'imbriquer avec les plateaux adjacents afin de former un plan nervuré capable de supporter un plan parallèle de plaques nervurées disposées perpendiculairement au sens de la portée des plateaux.

1.4.5 maintien partiel : Limitation du mouvement latéral ou de rotation, ou de la déformation par torsion ou par gauchissement, d'une barre ou d'une paroi grâce à laquelle on augmente sa résistance à l'instabilité comme le ferait un appui élastique, mais de façon moins importante que ne le ferait un appui rigide.

C Lorsque l'on évoque le comportement structural du profilé, on utilise le terme "barre" comme traduction du mot anglais "member".

Le maintien partiel peut également concerner une partie de section composée de plusieurs parois.

1.4.6 élancement relatif : Rapport d'élancement normalisé.

NOTE Dans l'ENV 1993-1-1, l'élancement relatif est appelé "élancement réduit".

1.4.7 maintien total : Empêchement du mouvement latéral ou de rotation, ou de la déformation par torsion ou par gauchissement, d'une barre ou d'une paroi grâce auquel on augmente sa résistance à l'instabilité comme le ferait un appui rigide.

1.4.8 dimensionnement avec collaboration de paroi : Méthode de calcul tenant compte de la contribution de l'effet de diaphragme, à la rigidité et à la résistance d'une structure.

1.4.9 appui : Emplacement où une barre peut transmettre les forces ou les moments à une fondation ou à une autre barre ou à un autre élément de la structure.

I Définition inutile dans le texte.

1.5 Symboles

(1) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les symboles principaux suivants sont utilisés :

C Rigidité élastique en rotation ;

K Rigidité élastique linéaire ;

θ Angle de rotation.

(2) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les indices suivants sont utilisés :

d Développé(e) ;

red Réduit(e) ;

spn Portée ;

sup Appui ;

TF En flexion-torsion.

(2) **C** L'indice d signifie "Développé(e)" seulement dans le cas où il est utilisé pour une dimension de paroi.

(3) Outre ceux donnés dans l'ENV 1993-1-1, les symboles importants suivants sont utilisés :

b_p Largeur de référence d'une paroi ;

h_w Hauteur d'une âme, mesurée entre les lignes moyennes des semelles ;

s_w Largeur d'une âme, mesurée entre les points médians des arrondis.

(4) D'autres symboles sont définis là où ils sont utilisés pour la première fois.

1.6 Unités

(1)P Les unités S.I. doivent être utilisées conformément à l'ISO 1000.

(2) L'utilisation des unités suivantes est recommandée pour les calculs :

- forces et charges : kN, kN/m, kN/m^2 ;
- masse volumique : kg/m^3 ;
- poids volumique : kN/m^3 ;
- contraintes : N/mm^2 (= MN/m^2 ou MPa) ;
- moments fléchissants : kNm ;
- moments de torsion : kNm.

1.7 Terminologie

1.7.1 Type de profils

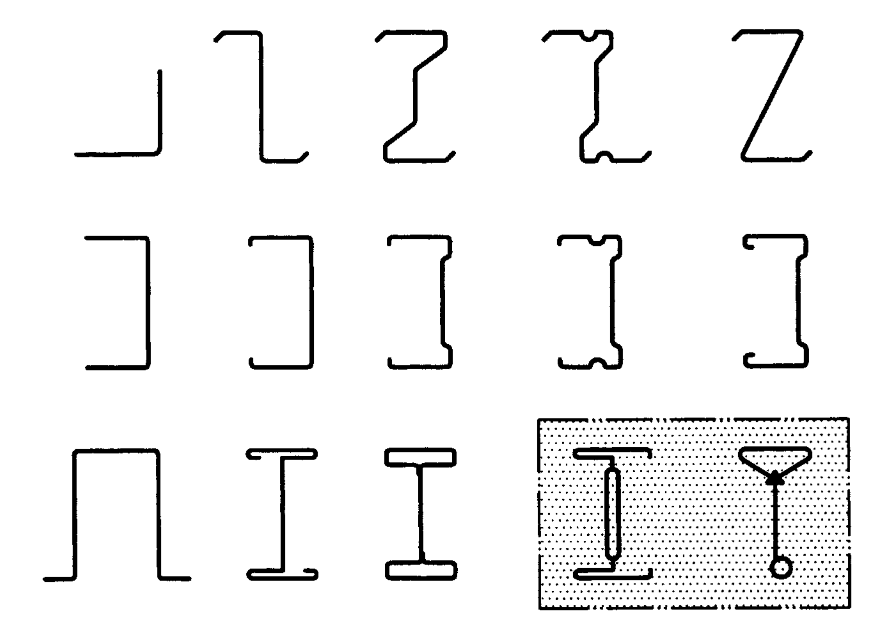
(1) Les profilés et les plaques formés à froid sont des produits en acier fabriqués à partir de produits plats laminés à chaud ou laminés à froid, revêtus ou non revêtus. Dans la limite des tolérances autorisées, ils présentent une épaisseur constante sur toute leur longueur, et peuvent avoir une section transversale constante ou variable.

NOTE Ces produits sont obtenus uniquement par formage à froid, par exemples profilés sur une machine à galets ou formés à la plieuse.

(2) Les sections transversales des profilés et plaques formés à froid sont composées pour l'essentiel de parois courbes et de parois planes.

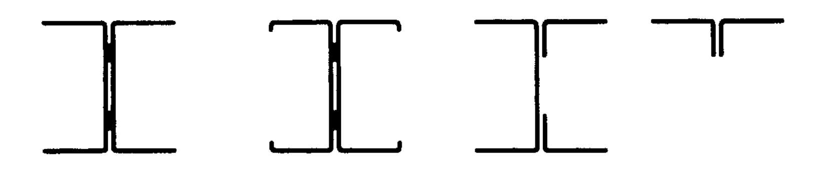
(3) Des profils typiques de profilés formés à froid sont :

- les profils ouverts simples, tels qu'illustrés par la figure 1.1(a) ;
- les profils ouverts reconstitués, tels qu'illustrés par la figure 1.1(b) ;
- les profils fermés reconstitués, tels qu'illustrés par la figure 1.1(c).

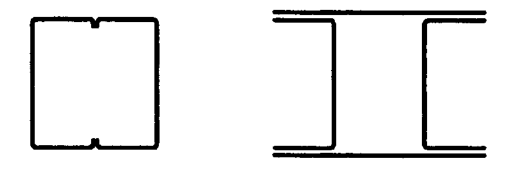


a) Profils ouverts simples

Figure 1.1 a) I	Les deux derniers exemples donnés n'appartiennent pas à cette catégorie de profils.



b) Profils ouverts reconstitués

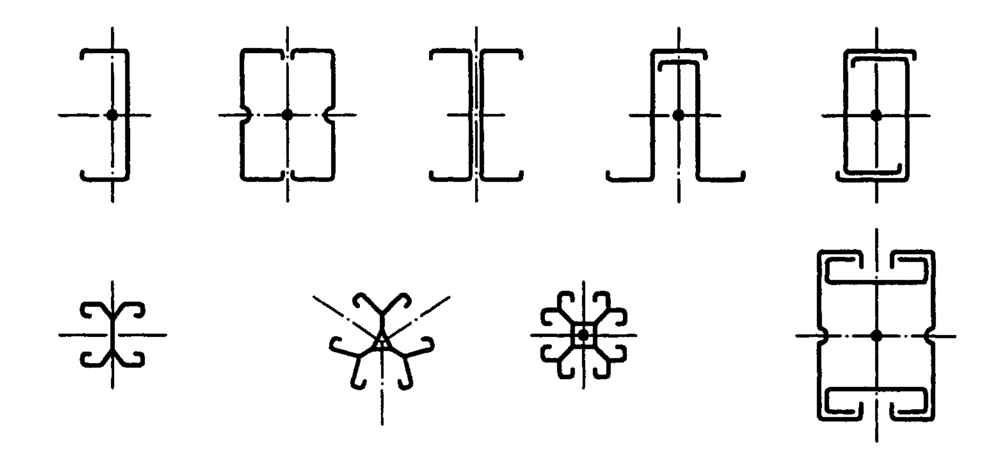


c) Profils fermés reconstitués

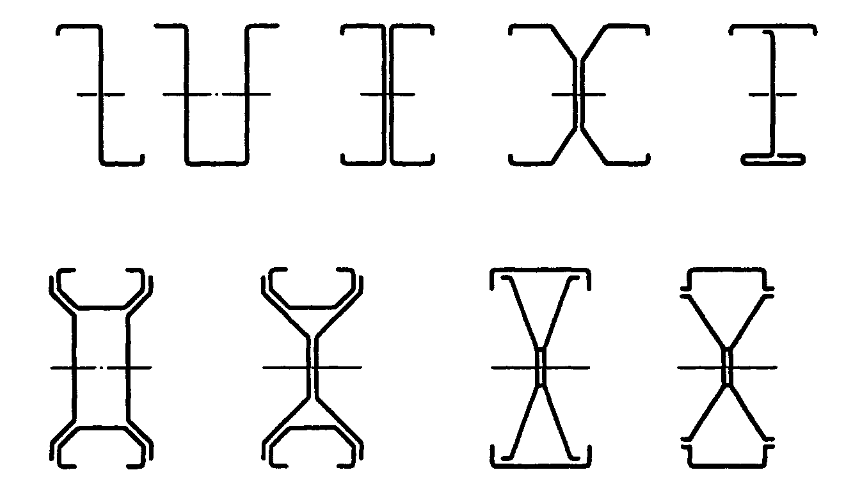
Figure 1.1 : Formes typiques de profils pour profilés formés à froid

(4) Des exemples de sections transversales de profilés et plaques formés à froid sont illustrés comme suit :

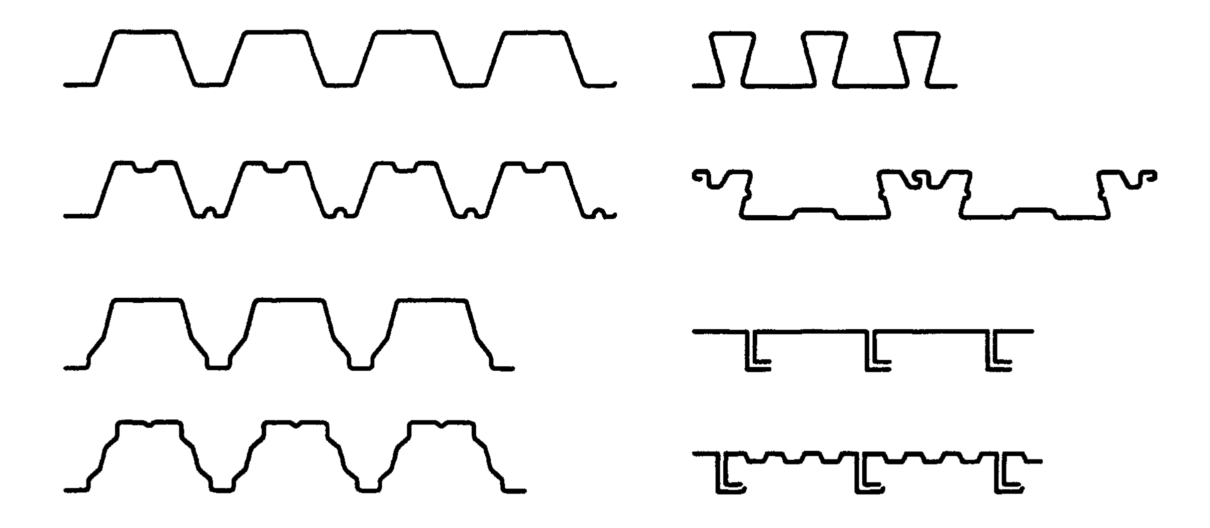
- barres comprimées et barres tendues, à la figure 1.2(a) ;
- poutres et autres barres fléchies, à la figure 1.2(b) ;
- plaques nervurées et plateaux, à la figure 1.2(c).



a) Barres comprimées et barres tendues



b) Poutres et autres barres fléchies



c) Plaques nervurées et plateaux

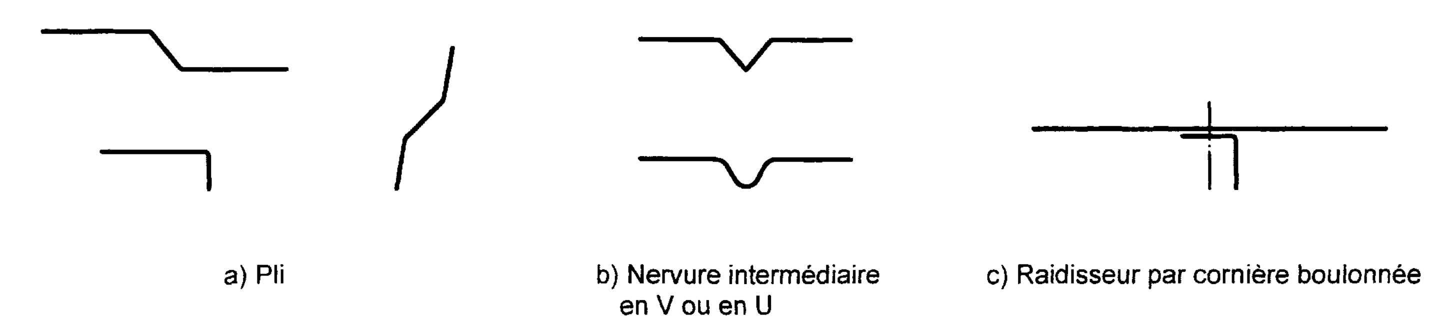
Figure 1.2 : Exemples de profilés et plaques formés à froid

(5) Les parois (âmes ou semelles) des sections transversales de profilés et plaques formés à froid peuvent ou non comporter des raidisseurs longitudinaux.

1.7.2 Type de raidisseurs

(1) Les formes typiques de raidisseurs destinés aux profilés et plaques formés à froid comprennent :

- des plis, voir figure 1.3(a) ;
- des nervures intermédiaires en V ou en U, voir figure 1.3(b) ;
- des profilés rapportés par boulonnage, rivetage ou soudage, voir figure 1.3(c).



a) Pli

b) Nervure intermédiaire en V ou en U

c) Raidisseur par cornière boulonnée

Figure 1.3 : Formes typiques de raidisseurs pour profilés et plaques formés à froid

(2) Les raidisseurs longitudinaux de semelles peuvent être soit des raidisseurs de bord, soit des raidisseurs intermédiaires.

(3) Les raidisseurs de bord typiques comprennent :

- les raidisseurs de bord à simple pli ou à bords tombés, voir figure 1.4(a) ;
- les raidisseurs de bord à double pli, voir figure 1.4(b).

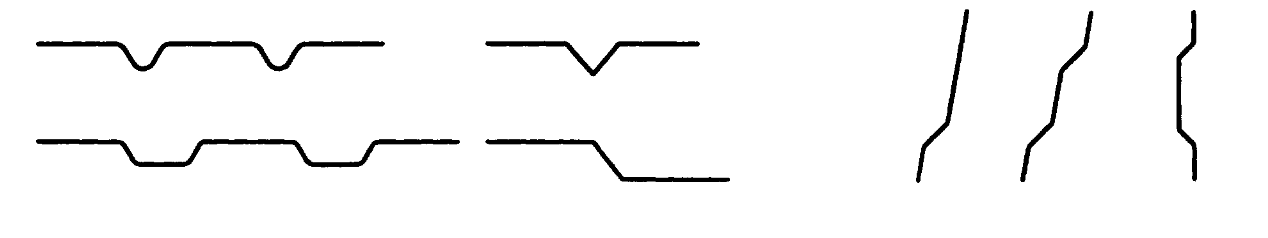


a) Raidisseurs de bord à simple pli — b) Raidisseurs de bord à double pli

Figure 1.4 : Raidisseurs de bord typiques

(4) Les raidisseurs longitudinaux intermédiaires typiques sont illustrés comme suit :

- pour les semelles, à la figure 1.5(a) ;
- pour les âmes, à la figure 1.5(b).



a) Raidisseurs intermédiaires de semelle — b) Raidisseurs intermédiaires d'âme

Figure 1.5 : Raidisseurs longitudinaux intermédiaires typiques

1.7.3 Dimensions de section transversale

(1) Les dimensions hors tout des profilés et plaques à parois minces formés à froid, largeur hors tout *b*, hauteur hors tout *h*, rayon intérieur de pliage *r* et autres dimensions notées par des symboles sans indices, tels que *a*, *c* ou *d*, sont considérées à partir de la tôle, sauf mention contraire.

(2) Sauf mention contraire, les autres dimensions de la section transversale des profilés et plaques à parois minces formés à froid, notées par des symboles indicés, tels que b_d, h_w ou s_w, sont considérées selon la ligne moyenne de la tôle ou selon la ligne d'épure de la paroi, ou au point médian de l'arrondi.

(3) Dans le cas de parois inclinées, comme les âmes des plaques nervurées, la largeur de l'âme *s* est considérée suivant la pente.

(4) La largeur développée d'une âme est considérée le long de sa ligne moyenne, y compris tout raidisseur.

(5) La largeur développée d'une semelle est considérée le long de sa ligne moyenne, y compris tout raidisseur intermédiaire.

1.7.4 Convention pour les axes des profilés

(1) Dans les Eurocodes Structuraux, la convention générale pour les axes des profilés est la suivante :

- x - x le long du profilé ;
- y - y axe de la section transversale ;
- z - z axe de la section transversale.

(2) Pour les profilés en acier formés à froid, la convention d'axes suivante est utilisée dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 :

- pour les sections transversales monosymétriques :
  - y - y axe de symétrie de la section transversale ;
  - z - z l'autre axe principal de la section transversale.
- autres cas :
  - y - y axe fort ;
  - z - z axe faible.
- en cas de besoin :
  - u - u axe perpendiculaire à la hauteur (s'il ne coïncide pas avec y - y ou z - z) ;
  - v - v axe parallèle à la hauteur (s'il ne coïncide pas avec y - y ou z - z).

NOTE Cette convention d'axes est différente de celle utilisée dans l'ENV 1993-1-1 afin de permettre de donner des règles pour le flambement par flexion-torsion qui puissent être appliquées à toutes les sections transversales de façon cohérente.

(3) L'utilisation des axes u - u et v - v est illustrée par la figure 1.6.

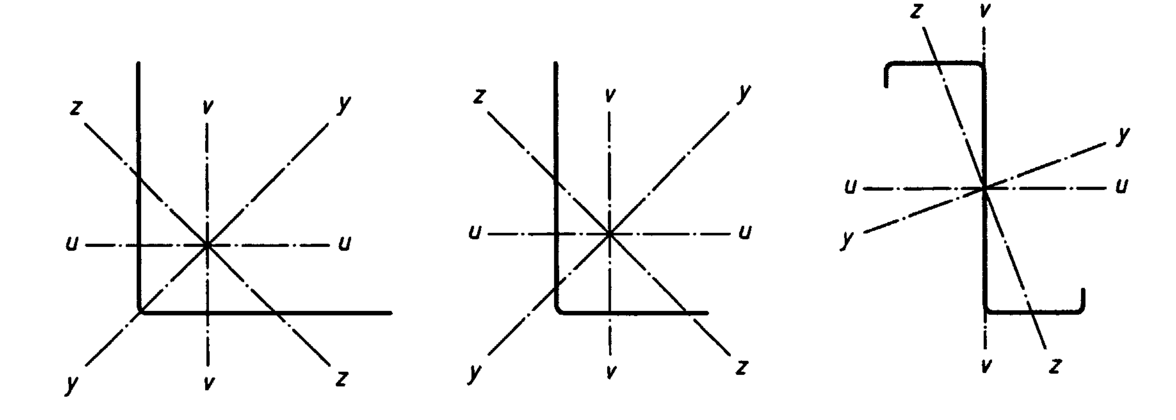


Figure 1.6 : Convention pour les axes

(4) Pour les plaques nervurées et les plateaux, la convention d'axes suivante est utilisée dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 :

- y - y axe parallèle au plan des plaques ;

- z - z axe perpendiculaire au plan des plaques.

2 Bases de calcul

2.1 Généralités

(1)P Afin de différencier les niveaux de fiabilité, on peut distinguer trois "classes de construction" définies de la façon suivante :

- **Classe de construction I** : Construction dans laquelle des profilés et plaques à parois minces formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et à la stabilité globales d'une structure.

- **Classe de construction II** : Construction dans laquelle des profilés et plaques à parois minces formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et à la stabilité d'éléments structuraux individuels.

- **Classe de construction III** : Construction dans laquelle les plaques formées à froid sont utilisées comme élément assurant seulement un transfert de charges à la structure.

(2)P Les méthodes de dimensionnement par calcul et de dimensionnement assisté par des essais, données dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993, peuvent être adoptées pour toutes les classes de construction.

(3)P Des coefficients partiels appropriés doivent être adoptés pour les états limites ultimes et pour les états limites de service.

(4)P Les valeurs des coefficients partiels données dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 doivent être adoptées pour la classe de construction I et pour la classe de construction II.

2.2 Etats limites ultimes

(1)P Les principes concernant les états limites ultimes donnés dans les sections 2 et 5 de la partie 1-1 de l'ENV 1993 doivent également être appliqués aux profilés et plaques à parois minces formés à froid.

(2) Les règles d'application concernant les états limites ultimes données dans les sections 2 et 4 de la partie 1-1 de l'ENV 1993 doivent également être appliquées, sauf lorsque des règles d'application différentes sont données dans la présente partie 1-3.

(3)P Pour les vérifications par calcul aux états limites ultimes, le coefficient partiel γ_M doit être pris égal aux valeurs suivantes :

- résistance des sections transversales lorsque la ruine ést due à une plastification :

$$\gamma_{M0} = \boxed{1,1}$$

- résistance des profilés et plaques lorsque la ruine est due à une instabilité:

$$\gamma_{M1} = \boxed{1,1}$$

(3)P I γ_{M0} =1.0 et γ_{M1} = 1,0 si les profilés et plaques à parois minces formés à froid respectent les 3 conditions suivantes :

- Réalisation à partir de bandes ou tôles d'acier de construction galvanisé à chaud en continu conformes aux normes P34-310 (avec tolérances d'épaisseur décalées) ou NF EN 10147 (avec tolérances d'épaisseur réduites ou spéciales selon la norme NF EN 10143)

- Fabrication avec les tolérances suivantes, mesurées dans les conditions des normes nationales en vigueur :

Hauteur h du profil

Profilés	Plaques	Tolérances (en mm)
h < 100	h < 50	± 1.00
100 ≤ h ≤ 220	50 ≤ h ≤ 100	± 1.25
h > 220	h > 100	± 1.50

Les valeurs ci-dessus sont également valables pour la largeur b de la semelle ou la largeur de la plage

Rectitude q (dans les deux plans)

Profilés	q ≤ 0.20 % L
Plaques	q ≤ 0.20 % L (limité à q maxi = 10 mm)

L : longueur du profilé ou de la plaque

Tolérance angulaire (entre éléments contigus)

Profilés	± 2° (3.50 %)

- Contrôles spécifiques, dont les résultats sont indiqués dans un certificat de réception " 3.1.B " conformément à la norme NF EN 10204, sur la matière (bande ou tôle d'acier) comme sur le produit (profilé ou plaque).

γ_{M0} =1.1 et γ_{M1} = 1,1 dans les autres cas

- résistance des sections nettes au niveau des trous de boulons :

$$\gamma_{M2} = \boxed{1{,}25}$$

(4)P Pour les valeurs de γ_M concernant la résistance des assemblages, voir section 8 de la présente partie 1-3.

2.3 Etats limites de service

(1)P Les principes concernant les états limites de service donnés dans les sections 2 et 4 de la partie 1-1 de l'ENV 1993 doivent également être appliqués aux profilés et plaques à parois minces formés à froid, voir 7.1(1)P dans la présente partie 1-3.

(2) Les règles d'application concernant les états limites de service données dans les sections 2 et 4 de la Partie 1-1 de l'ENV 1993 doivent également être appliquées, sauf lorsque des règles d'application différentes sont données dans la section 7 de la présente partie 1-3.

(3)P Pour les vérifications aux états limites de service, le coefficient partiel γ_M doit être pris égal à la valeur suivante :

$$\gamma_{M,ser} = \boxed{1,0}$$

2.4 Dimensionnement assisté par des essais

(1)P Les vérifications aux états limites ultimes ou aux états limites de service qui s'appuient sur des résultats d'essais doivent respecter les dispositions de la section 9.

(2) Il convient que les échantillons de plaques comprennent au minimum deux nervures complètes, mais un échantillon peut comprendre seulement une seule nervure à condition que la rigidité des nervures soit suffisante.

2.5 Durabilité

(1)P Afin d'assurer une durabilité convenable des éléments formés à froid dans des conditions correspondant à leur utilisation et à leur durée de vie prévues, les facteurs suivants, qui sont interdépendants, doivent être pris en compte lors du calcul :

- l'utilisation prévue de la structure ;
- les critères de performance exigés ;
- les conditions d'environnement prévues ;
- la composition, les caractéristiques et les performances des matériaux ;
- les effets de l'assemblage des différents matériaux entre eux ;
- la forme des profilés et les détails de construction ;
- la qualité d'exécution et le niveau de contrôle ;
- les mesures de protection particulières ;
- l'entretien susceptible d'être effectué au cours de la durée de vie prévue.

(2)P Les conditions d'environnement intérieur et extérieur doivent être estimées lors du calcul afin d'évaluer leur importance en termes de durabilité et de permettre la mise en oeuvre de mesures appropriées pour protéger les matériaux.

(3) Il convient d'apporter une attention particulière aux cas dans lesquels différents matériaux sont prévus pour agir de manière combinée, si ces matériaux sont tels que des phénomènes électrochimiques sont susceptibles de créer des conditions entraînant la corrosion.

(4) Il convient de prendre en considération les conditions d'environnement existant depuis la fabrication, y compris celles du transport et du stockage sur chantier.

3 Caractéristiques des matériaux et des sections transversales

3.1 Aciers de construction

3.1.1 Généralités

(1)P Tous les aciers utilisés pour les profilés et plaques formés à froid doivent être aptes au formage à froid et au soudage. Les aciers utilisés pour les profilés et plaques destinés à être galvanisées doivent également être aptes à la galvanisation.

(2)P Les méthodes de dimensionnement par calcul données dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 peuvent être utilisées pour les aciers de construction conformes aux normes européennes et aux normes internationales mentionnées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Valeurs nominales de limite d'élasticité de base f_{yb} et de résistance à la traction f_u

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm²	f_u N/mm²
Tôles en acier de construction laminées à chaud	EN 10025	S235 S275 S355	235 275 355	360 430 510
Tôles en acier de construction à haute limite d'élasticité laminées à chaud	EN 10113-2	S275N S355N S420N S460N	275 355 420 460	370 470 520 550
	EN 10113-3	S275M S355M S420M S460M	275 355 420 460	360 450 500 530
Tôles en acier de construction laminées à froid	ISO 4997	CR220 CR250 CR320	220 250 320	300 330 400
Tôles en acier de construction galvanisées à chaud en continu	EN 10147	Fe E 220 G Fe E 250 G Fe E 280 G Fe E 320 G Fe E 350 G	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid	EN 10149-2	S315MC S355MC S420MC S460MC S500MC S550MC	315 355 420 460 500 550	390 430 480 520 550 600
	EN 10149-3	S260NC S315NC S355NC S420NC	260 315 355 420	370 430 470 530

Tableau 3.1 **C** Les anciennes désignations des produits définis par la norme NF EN 10147 sont à remplacer par les nouvelles désignations indiquées dans le tableau ci-après :

Ancienne désignation	Nouvelle désignation
Fe E 220G	S220GD+Z
Fe E 250G	S250GD+Z
Fe E 280G	S280GD+Z
Fe E 320G	S320GD+Z
Fe E 350G	S350GD+Z

Tableau 3.1 **A** Le tableau 3.1 est à compléter par les tôles en acier de construction relevant des normes NF EN 10214 et NF EN 10215.

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Tôles en acier de construction revêtues à chaud en continu d'alliage zinc-aluminium (ZA)	NF EN 10214	S220GD+ZA	220	300
		S250GD+ZA	250	330
		S280GD+ZA	280	360
		S320GD+ZA	320	390
		S350GD+ZA	350	420
Tôles en acier de construction revêtues à chaud en continu d'alliage aluminium-zinc (AZ)	NF EN 10215	S220GD+AZ	220	300
		S250GD+AZ	250	330
		S280GD+AZ	280	360
		S320GD+AZ	320	390
		S350GD+AZ	350	420

(3)P Ces méthodes de calcul peuvent également être appliquées à d'autres aciers de construction possédant des caractéristiques de résistance et de ductilité semblables, à condition que toutes les conditions ci-après soient satisfaites :

a) l'acier respecte les prescriptions relatives à l'analyse chimique, aux essais mécaniques et aux autres procédures de contrôle, de manière équivalente à ce qui est prescrit dans les normes mentionnées dans le tableau 3.1 ;

b) le rapport de la résistance à la traction minimale spécifiée f_u à la limite d'élasticité de base minimale spécifiée f_{yb} n'est pas inférieur à 1,2 ;

(3) b) **C** Dans les normes de produit, on utilise en général d'autres symboles pour désigner la limite d'élasticité.

c) l'acier est fourni :

- soit par référence à une autre norme reconnue pour les tôles en acier de construction ;
- soit avec des caractéristiques mécaniques et une composition chimique au moins équivalentes à celles de l'une des nuances d'acier mentionnées dans le tableau 3.1.

(4)P Les valeurs nominales de limite d'élasticité de base f_{yb} et de résistance à la traction f_u données dans le tableau 3.1 doivent être adoptées en tant que valeurs caractéristiques dans les calculs de dimensionnement. Pour les autres aciers, les valeurs caractéristiques doivent être basées sur les résultats d'essais de traction réalisés conformément à l'EN 10002-1.

(5) Il convient de considérer les caractéristiques de l'acier en compression identiques à celles de l'acier en traction.

(6)P Lorsque le symbole f_y est utilisé pour désigner la limite d'élasticité, on peut utiliser la limite d'élasticité moyenne f_{ya}, si les conditions données en 3.1.2 sont satisfaites ; si ces conditions ne sont pas respectées, on doit utiliser la limite d'élasticité de base f_{yb}. Lorsque le symbole f_{yb} est utilisé pour désigner la limite d'élasticité, on doit utiliser la limite d'élasticité de base f_{yb}.

(7) Pour les aciers couverts par la présente partie 1-3 de l'ENV 1993, les autres caractéristiques de l'acier à utiliser dans le calcul doivent être prises égales aux valeurs suivantes :

- module d'élasticité : $E = 210\,000$ N/mm^2 ;
- module de cisaillement : $G = E / 2\,(1 + \nu)$ N/mm^2 ;

- coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$;

- coefficient de dilatation linéaire : $\alpha = 12 \times 10^{-6}\ K^{-1}$;

- masse volumique : $\rho = 7850\ kg/m^3$.

3.1.2 Limite d'élasticité moyenne

(1)P La limite d'élasticité moyenne f_{ya} d'une section transversale, après formage à froid, peut être déterminée à partir de résultats d'essais sur section complète conformément aux dispositions de la section 9.

(2)P De manière alternative, la limite d'élasticité moyenne augmentée f_{ya} peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb})\, knt^2 / A_g \quad \text{avec } f_{ya} \leq (f_u + f_{yb}) / 2 \qquad \text{... (3.1)}$$

où :

Ag est l'aire de section transversale brute ;

k est un coefficient numérique dépendant du type de formage, de la façon suivante :

- $k = 7$ pour le profilage à froid aux galets ;
- $k = 5$ pour les autres méthodes de formage ;

n est le nombre de plis à 90° dans la section transversale avec un rayon intérieur $r \leq 5t$ (il convient de tenir compte des angles de plis inférieurs à 90° sous forme de fractions de n) ;

(2) C	n peut être évalué en divisant la somme des angles intérieurs de pliage présentant un rayon intérieur $r \leq 5$ t par 90°.

t	**est l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor} de la tôle d'acier avant le formage à froid, à l'exclusion de tout revêtement de zinc ou de tout revêtement organique, voir 3.1.3.**

I	t est l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor} de la tôle d'acier avant le formage à froid, à l'exclusion de tout revêtement, voir 3.1.3.

(3)P La limite d'élasticité augmentée par le formage à froid doit être prise en compte uniquement de la façon suivante :

- pour les barres soumises à une charge axiale et dont l'aire efficace de section transversale A_{eff} est égale à l'aire brute A_g ;
- dans les autres cas où il peut être démontré que les effets du formage à froid entraînent une augmentation de la capacité portante.

(4) Pour la détermination de A_{eff}, il convient de prendre f_{yb} pour la limite d'élasticité f_y.

(5) La limite d'élasticité moyenne f_{ya} peut être utilisée pour déterminer :

- la résistance de section transversale d'une barre tendue soumise à une charge axiale ;
- la résistance de section transversale ainsi que la résistance au flambement d'une barre comprimée soumise à une charge axiale lorsque la section transversale est pleinement efficace ;

- **le moment résistant d'une section transversale efficace en flexion simple.**

I Cas non retenu.

C Cependant, la prise en compte de l'écrouissage peut s'effectuer.

(6) Pour déterminer le moment résistant d'une section transversale comportant des semelles pleinement efficaces, on peut subdiviser la section transversale en *m* parois nominales, telles des semelles. On peut ensuite utiliser l'expression (3.1) pour obtenir des valeurs de limite d'élasticité augmentée $f_{y,i}$ séparément pour chaque paroi nominale *i*, à condition que :

$$\sum_{i=1}^{m} A_{g,i} f_{y,i} \; / \; \sum_{i=1}^{m} A_{g,i} \leq f_{ya} \qquad \ldots (3.2)$$

où $A_{g,i}$ est l'aire de section transversale brute de la paroi nominale *i*.

(6) C Pour la détermination de $f_{y,i}$ par l'expression (3.1), les plis aux frontières de parois sont comptés pour la moitié de leur angle dans chaque aire $A_{g,i}$

(7)P L'augmentation de limite d'élasticité après formage à froid ne doit pas être utilisée pour les profilés soumis après formage à un traitement thermique à une température supérieure à 520° C pendant plus d'une heure.

(8) Il convient d'accorder une attention particulière au fait que certains traitements thermiques (particulièrement le recuit) peuvent provoquer l'abaissement de la limite d'élasticité à une valeur inférieure à celle de la limite d'élasticité de base f_{yb}.

3.1.3 Epaisseur

(1)P On peut utiliser les dispositions données pour le dimensionnement par calcul dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 seulement pour l'acier qui présente une épaisseur nominale de métal nu t_{cor} , à l'exclusion de tout revêtement de zinc ou de tout revêtement organique, se situant dans la gamme de valeurs suivante :

- pour les plaques : 0,5 mm $\leq t_{cor} \leq$ 4,0 mm ;

- pour les profilés : 1,0 mm $\leq t_{cor} \leq$ 4,0 mm.

(1)P I Les dispositions données pour le dimensionnement par calcul dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 peuvent être utilisées seulement pour l'acier qui présente une épaisseur nominale de métal nu t_{cor} , à l'exclusion de tout revêtement, se situant dans la gamme de valeurs suivante :

- pour les plaques : 0,45 mm $\leq t_{cor} \leq$ 4,0 mm ;

- pour les profilés : 0,95 mm $\leq t_{cor} \leq$ 8,0 mm.

(2)P Des matériaux plus minces ou plus épais peuvent également être utilisés, à condition que la capacité portante soit déterminée par dimensionnement assisté par des essais conformément à la section 9.

(3)P Etant donné que les différentes dispositions concernant le calcul des profilés et des plaques formés à froid données dans la présente partie 1-3 ont été élaborées sur la base de tolérances d'épaisseur qui sont approximativement la moitié des valeurs de tolérances prescrites comme "tolérances normales" dans l'EN 10143, les valeurs nominales d'épaisseur t_{nom} doivent être ajustées de façon à conserver une fiabilité équivalente, si l'on utilise des tolérances supérieures .

(4) Pour les profilés et les plaques, revêtus d'un métal en continu par immersion à chaud, d'une épaisseur nominale t_{nom} < 1,5 mm fournis avec des tolérance négatives égales aux "tolérances réduites (S)" données dans l'EN 10143, l'épaisseur de calcul t peut être prise égale à l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor}.

(4) **I** Pour les profilés et les plaques, revêtus d'un métal en continu par immersion à chaud, d'une épaisseur nominale $t_{nom} \leq 3$ mm fournis avec des tolérances décalées (D) données dans la norme P 34-310, ou des tolérances réduites (S) données dans la norme NF EN 10143, l'épaisseur de calcul t peut être prise égale à l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor}.

(5) Dans le cas des tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud conformes à l'EN 10147, l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor} peut être prise égale à t_{nom} - t_{zin}, où t_{nom} représente l'épaisseur nominale de la tôle et t_{zin} représente l'épaisseur totale de revêtement de zinc, pour les deux faces.

NOTE Pour le revêtement courant de zinc Z 275, t_{zin} = 0,04 mm.

(5) **I** Dans le cas des tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud conformes à la NF EN 10147, la NF EN 10214 ou la NF EN 10215, l'épaisseur nominale de métal nu t_{cor} peut être prise égale à t_{nom} - t_{rev} , où t_{nom} représente l'épaisseur nominale de la tôle et t_{rev} représente l'épaisseur totale du revêtement métallique, pour les deux faces.

NOTE Pour le revêtement de zinc Z 275, t_{rev} = 0,04 mm.

Pour le revêtement d'alliage zinc-aluminium ZA 200, t_{rev} = 0,03 mm

Pour le revêtement d'alliage aluminium-zinc AZ 150, t_{rev} = 0,04 mm.

3.2 Dispositifs d'assemblage

3.2.1 Assemblages par boulons

(1)P Les boulons, écrous et rondelles doivent être conformes aux prescriptions données dans l'ENV 1993-1-1.

3.2.2 Autres types de fixations mécaniques

(1)P Les autres types de fixations mécaniques indiqués ci-dessous peuvent être utilisés :

- vis autotaraudeuses ou autoperceuses ;
- clous à scellement ;
- rivets aveugles.

(1) **A** L'emploi des rivets aveugles n'est considéré que pour les assemblages de couture.

(2)P Les vis autotaraudeuses ou autoperceuses peuvent être :

- des vis autotaraudeuses par déformation ;
- des vis autotaraudeuses par enlèvement de matière ;
- des vis autoperceuses.

(3) Pour les détails concernant le type approprié de vis autotaraudeuses ou autoperceuses, de clous à scellement et de rivets aveugles, se référer à l'ENV 1090-2. [1)]

(3) I Pour les détails concernant le type approprié de vis autotaraudeuses ou autoperceuses, de clous à percussion et de rivets aveugles, se référer aux normes et documents nationaux en vigueur, selon la destination des ouvrages ou parties d'ouvrages.

3.2.3 Produits d'apport de soudage

(1)P Les produits d'apport de soudage doivent satisfaire aux prescriptions données dans l'ENV 1993-1-1.

3.3 Caractéristiques des sections

3.3.1 Généralités

(1)P Les caractéristiques des sections doivent être calculées, en tenant compte de la sensibilité des caractéristiques de la section transversale globale à toutes les approximations utilisées, voir 3.3.4, ainsi que de leur influence sur la résistance prévisible de la barre.

(2)P Les effets du voilement local doivent être pris en compte par l'utilisation de sections transversales efficaces, comme indiqué à la section 4.

3.3.2 Section transversale brute

(1)P Les caractéristiques de la section transversale brute doivent être déterminées en utilisant les dimensions nominales spécifiées. Dans le calcul des caractéristiques de la section transversale brute, il n'est pas nécessaire de déduire les trous de fixation, mais il faut tenir compte des ouvertures de grandes dimensions. Les plaques servant seulement pour l'éclissage ou comme traverses de liaison ne doivent pas être prises en compte.

3.3.3 Aire nette

(1)P L'aire nette de la section transversale d'une barre, ou d'une paroi d'une section transversale, doit être prise égale à son aire brute diminuée de l'aire de la totalité des trous de fixations et autres ouvertures.

(2)P Lorsqu'on déduit les trous de fixation, on doit utiliser le diamètre nominal du trou et non le diamètre de la fixation.

(3) Pour les trous fraisés, l'aire à déduire doit être l'aire de la section transversale brute totale du trou, comprenant la partie fraisée, dans un plan diamétral.

(4)P A condition que les trous de fixation ne soient pas en quinconce, l'aire à déduire de l'aire de section transversale brute doit être la somme maximale des aires des trous de fixation dans toute section transversale perpendiculaire au sens de la contrainte normale s'exerçant dans la barre.

(5)P Lorsque les trous de fixation sont en quinconce, l'aire à déduire doit être la plus grande des valeurs ci-après :

a) la déduction pour les trous alignés donnée en (4)P ;

b) la somme des aires de tous les trous placés selon toute diagonale ou toute ligne brisée s'étendant en travers de la barre ou de l'élément, voir figure 3.1, diminuée pour chaque espacement p dans la suite de trous d'une valeur prise égale à $0,25\ s^2\ t\ /\ p$, mais sans être supérieure à $0,6st$, où :

   p est la pince transversale, c'est-à-dire la distance mesurée perpendiculairement au sens de la transmission des efforts, à l'entr'axe de deux trous consécutifs dans la suite de trous ;

   s est la pince de quinconce, c'est-à-dire la distance mesurée parallèlement au sens de la transmission des efforts, à l'entr'axe des deux mêmes trous ;

   t est l'épaisseur de la pièce percée .

---

1) Ce document est en préparation

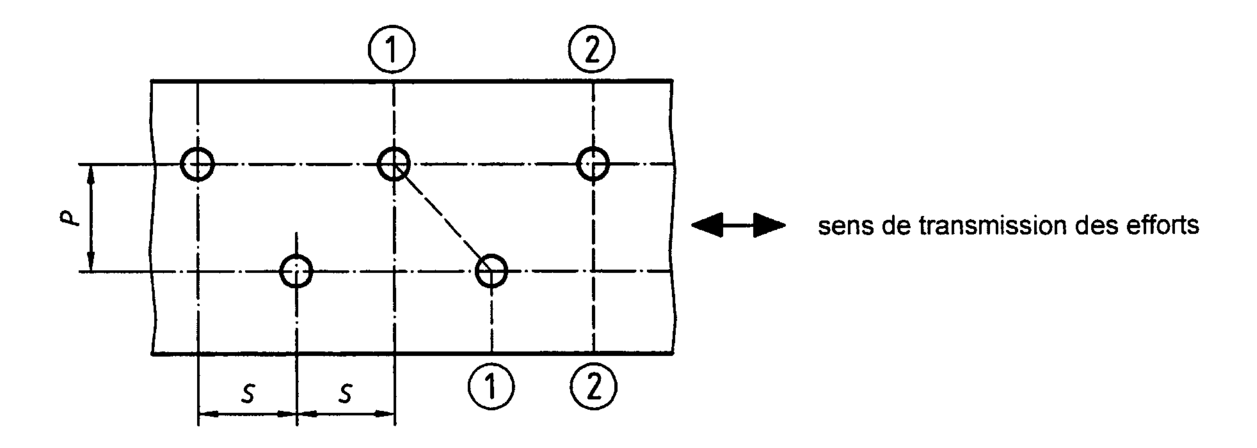


Figure 3.1 : Trous en quinconce et sections s'y rapportant

(6)P Pour des sections transversales telles que des cornières comportant des trous dans plusieurs plans, la pince p doit être mesurée suivant la ligne moyenne de la pièce, voir figure 3.2.

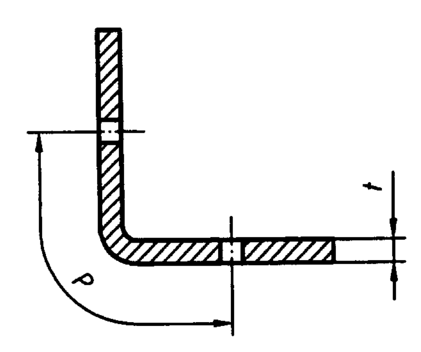


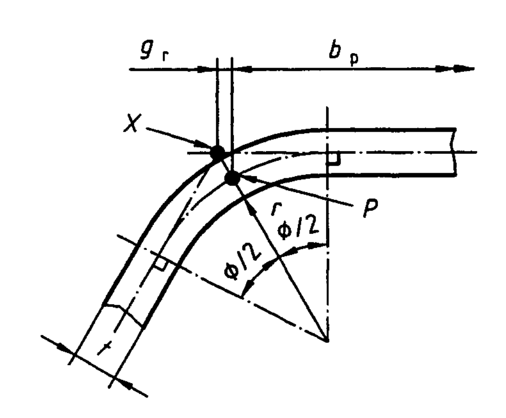
Figure 3.2 : Cornières comportant des trous dans les deux ailes

(7)P Dans un profilé reconstitué où la suite critique de trous dans chacun des éléments le composant, ne correspond pas à la suite critique de trous pour la globalité du profilé, les résistances de toutes fixations assemblant les éléments entre ces suites de trous doivent être prises en compte pour la détermination de la résistance de la barre.

NOTE Aucune règle générale ne peut être donnée pour les éléments perforés en continu, car la résistance dépend de la forme et de la disposition des perforations.

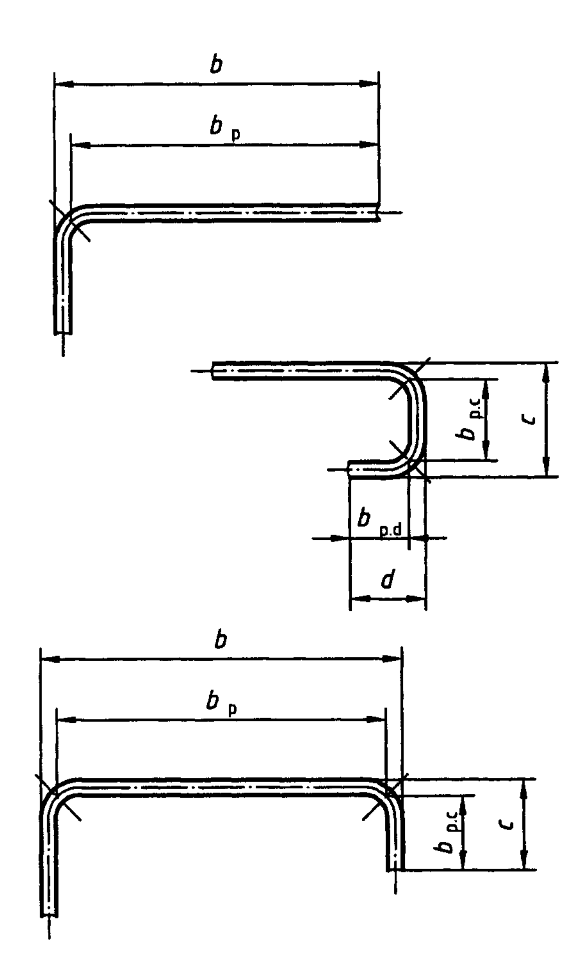
3.3.4 Influence des arrondis

(1)P Dans les sections transversales comportant des arrondis, les largeurs de référence des parois b_p doivent être mesurées à partir des points médians des parois d'angle adjacentes, comme indiqué sur la figure 3.3.

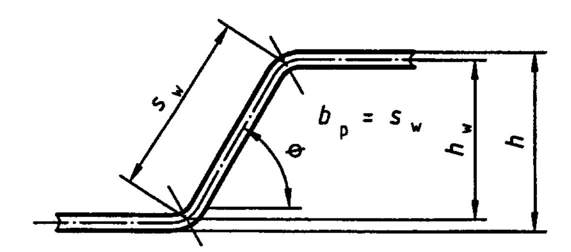


X est l'intersection des lignes moyennes
P point médian de l'arrondi
$r_m = r + t / 2$
$g_r = r_m [\tan(\phi/ 2) - \sin(\phi/ 2)]$

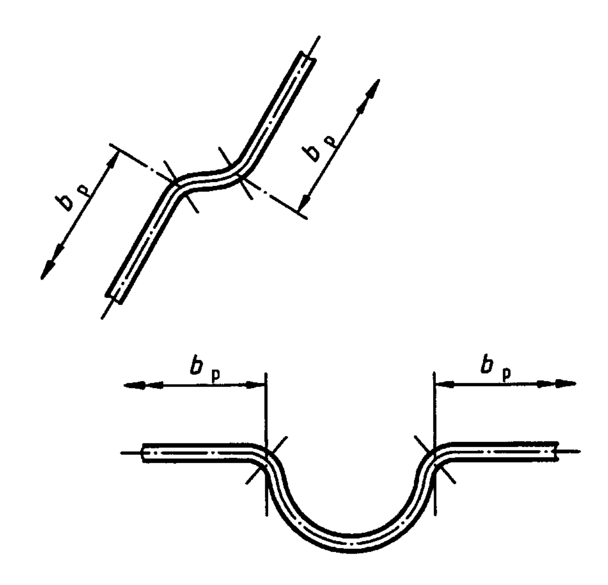
a) point médian d'arrondi ou de pli



b) largeur de référence b_p des parois b, c et d



c) largeur de référence b_p pour une âme (b_p = largeur inclinée s_w)



d) largeur de référence b_p de parois adjacentes à des raidisseurs

Figure 3.3 : Largeurs de référence des parois b_p tenant compte des rayons d'arrondi

(2)P Dans les sections comportant des arrondis, le calcul des caractéristiques de section doit être basé sur la géométrie réelle de la section transversale.

(3) L'influence des arrondis de rayon intérieur de pliage $r \leq 5t$ et $r \leq 0{,}15\ b_p$ sur les caractéristiques de section peut être négligée, et la section transversale peut être considérée comme composée de parois planes à angles vifs.

(3) I Disposition non retenue.

(4) Si le rayon intérieur de pliage r dépasse les limites données en (3), l'influence des arrondis sur les caractéristiques de section doit être prise en compte. Ceci peut être effectué avec une précision suffisante en réduisant les caractéristiques calculées pour une section transversale similaire comportant des angles vifs, voir figure 3.4, à l'aide des approximations suivantes :

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad \text{... (3.3a)}$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad \text{... (3.3b)}$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad \text{... (3.3c)}$$

(4) I Il convient de prendre en considération, l'influence des arrondis sur les caractéristiques de section. Ceci peut être effectué avec une précision suffisante en réduisant les caractéristiques calculées pour une section transversale similaire comportant des angles vifs, voir figure 3.4, à l'aide des approximations suivantes :

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad \text{... (3.3a)}$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad \text{... (3.3b)}$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad \text{... (3.3c)}$$

avec :

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^{n} r_j \Big/ \sum_{i=1}^{m} b_{p,i} \quad \text{... (3.3d)}$$

où :

A_g est l'aire de la section transversale brute ;

$A_{g,sh}$ est la valeur de A_g pour une section transversale avec angles vifs ;

$b_{p,i}$ est la largeur de référence de la paroi i pour une section avec angles vifs ;

(4) C Pour les âmes, $b_{p,i} = s_{w,i}$

I_g est le moment d'inertie de flexion de la section transversale brute ;

$I_{g,sh}$ est la valeur de I_g pour une section transversale avec angles vifs ;

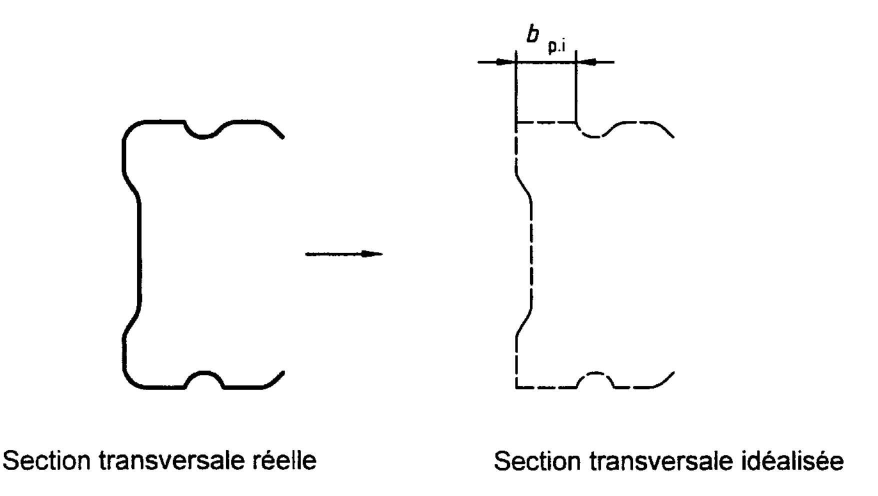
I_w est le moment d'inertie de gauchissement de la section transversale brute ;

$I_{w,sh}$ est la valeur de I_w pour une section transversale avec angles vifs ;

m est le nombre de parois planes ;

n est le nombre de plis ;

r_j est le rayon intérieur de l'arrondi j.



Section transversale réelle

Section transversale idéalisée

Figure 3.4 : Prise en compte approchée des angles arrondis

Figure 3.4 I Le titre de la figure 3.4 est supprimé.

(5) Les réductions données par l'expression (3.3) peuvent également être appliquées lors du calcul des caractéristiques de section efficace A_{eff}, $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ et $I_{w,eff}$, à condition que les largeurs de référence des parois soient mesurées entre les points d'intersection de leurs lignes moyennes.

3.4 Proportions géométriques

(1)P Les dispositions données dans la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 pour le dimensionnement par calcul ne doivent pas être appliquées aux sections transversales dont les rapports largeur sur épaisseur ne se situent pas dans la gamme de valeurs pour laquelle il existe suffisamment d'expérience et de vérifications par essais.

(2) Les rapports maximums largeur sur épaisseur b/t et h/t donnés dans le tableau 3.2 peuvent être considérés comme représentant le domaine pour lequel il existe déjà suffisamment d'expérience et de vérifications par essais.

Tableau 3.2 : Rapports largeur-épaisseur maximum

Paroi de section transversale	Valeur maximale
b, t	$b / t \leq 50$
b, c, t	$b / t \leq 60$
b, c, d, t	$b / t \leq 90$
b, t	$b / t \leq 500$
h, ϕ	$45° \leq \phi \leq 90°$ $h / t \leq 500 \sin\phi$

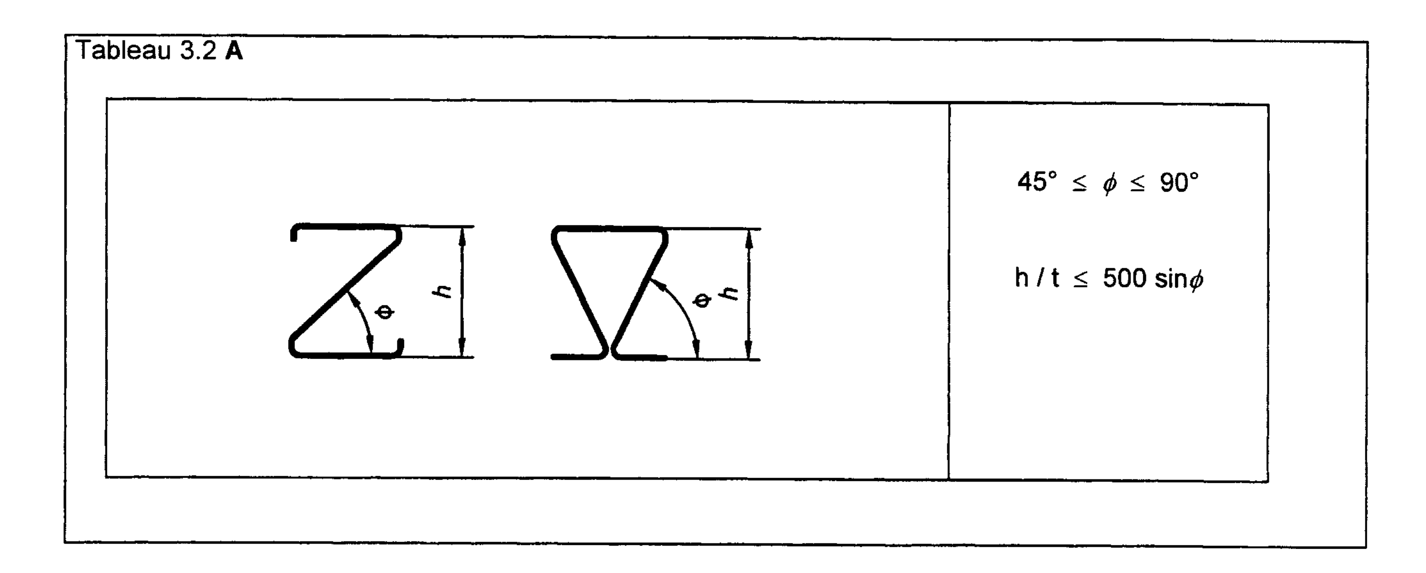


Tableau 3.2 **A**

(3) Les sections transversales présentant des rapports largeur sur épaisseur plus élevés peuvent également être utilisées, à condition que leur résistance aux états limites ultimes et leur comportement aux états limites de service soient vérifiés par essais conformément à la section 9.

(4) Afin de garantir une rigidité suffisante et d'éviter le flambement du raidisseur lui-même, il convient que les dimensions des raidisseurs se situent dans la gamme de valeurs suivante :

$$0,2 \leq c / b \leq 0,6 \qquad \ldots(3.4a)$$

$$0,1 \leq d / b \leq 0,3 \qquad \ldots(3.4b)$$

où b, c et d représentent les dimensions indiquées dans le tableau 3.2.

3.5 Modélisation pour l'analyse des sections transversales

(1) Les parois d'une section transversale peuvent être modélisées en vue de l'analyse comme indiqué dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Modélisation des parois d'une section transversale

Type de paroi	Modèle	Type de paroi	Modèle

(2) Il convient de prendre en compte l'influence mutuelle des raidisseurs multiples.

(2) I Clause supprimée

4. Voilement local

C Les sections 4, 5 et 6 s'inscrivent dans la perspective d'une justification par calculs.

4.1 Généralités

(1)P Les effets du voilement local doivent être pris en compte pour la détermination de la résistance et de la rigidité des profilés et plaques formés à froid.

(2)P Ceci peut être fait en utilisant les caractéristiques de section transversale efficace, calculées sur la base des largeurs efficaces des parois qui sont exposées au voilement local.

(3)P On doit prendre en compte le décalage de l'axe centroïde de la section transversale efficace par rapport à l'axe centroïde de la section transversale brute.

(3)P **C**	On dénomme par axe centroïde, l'axe passant par le centre de gravité.

(4) Pour la détermination de la résistance au voilement local, il convient de prendre la valeur f_{yb} pour la limite d'élasticité f_y.

(5) Pour la détermination de la résistance d'une section transversale, il convient de baser la largeur efficace d'une paroi comprimée sur la contrainte de compression $\sigma_{com,Ed}$ s'exerçant dans la paroi lorsque la résistance de la section transversale est atteinte.

(6) Pour les vérifications d'aptitude au service, il convient de baser la largeur efficace d'une paroi comprimée sur la contrainte de compression $\sigma_{com,Ed,ser}$ s'exerçant dans la paroi sous l'effet des charges à l'état limite de service.

4.2 Parois sans raidisseurs

(1)P Les largeurs efficaces des parois comprimées doivent être obtenues d'après le tableau 4.1 pour les parois comprimées sur deux appuis, ou d'après le tableau 4.2 pour les parois comprimées en console.

Tableau 4.1 : Parois comprimées sur deux appuis

Distribution des contraintes [compression positive]	Largeur efficace b_{eff}
σ_1 + σ_2 b_{e1} b_{e2} b_p	**ψ = +1 :** $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0{,}5\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}5\ b_{eff}$
σ_1 + σ_2 b_{e1} b_{e2} b_p	**+1 > $\psi \geq$ 0 :** $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 2\ b_{eff}\ /\ (5 - \psi)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
σ_1 + σ_2 b_{e1} b_{e2} b_p	**0 > $\psi \geq$ -1 :** $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0{,}4\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}6\ b_{eff}$
b_c b_t σ_1 σ_2 b_{e1} b_{e2} b_p	**ψ < -1 :** $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0{,}4\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}6\ b_{eff}$

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	+1 > ψ > 0	0	0 > ψ > -1	-1	-1 > ψ > -3
Coefficient de voilement k_σ	4,0	$8{,}2 / (1{,}05 + \psi)$	7,81	$7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\psi^2$	23,9	$5{,}98(1 - \psi)^2$

De manière alternative pour $+1 \geq \psi \geq -1$:

$$k_\sigma = \frac{16}{\left[(1+\psi)^2 + 0{,}112(1-\psi)^2\right]^{0,5} + (1+\psi)}$$

Tableau 4.2 : Parois comprimées en console

Distribution des contraintes [compression positive]	Largeur efficace b_{eff}
b_{eff} σ_2 + σ_1 b_p	$+1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho b_p$
b_t b_c b_{eff} + σ_1 σ_2 b_p	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c$

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	0	- 1	$+1 \geq \psi \geq -1$
Coefficient de voilement k_σ	0,43	0,57	0,85	$0{,}57 - 0{,}21\psi + 0{,}07\psi^2$

Distribution des contraintes [compression positive]	Largeur efficace b_{eff}
b_{eff} σ_1 + σ_2 b_p	$+1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho b_p$
b_c b_t b_{eff} σ_1 + σ_2 b_p	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c$

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$+1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de voilement k_σ	0,43	$\frac{0{,}578}{\psi + 0{,}34}$	1,70	$1{,}70 - 5\psi + 17{,}1\psi^2$	23,8

(2)P La largeur de référence d'une paroi b_p doit être déterminée comme indiqué en 3.3.4. Dans le cas des parois dans une âme inclinée, on doit utiliser la largeur appropriée.

NOTE Dans l'ENV 1993-1-1, on utilise le symbole $\overline{b}$ pour la largeur de référence d'une paroi.

(3)P Le coefficient de réduction ρ utilisé dans les tableaux 4.1 et 4.2 pour déterminer b_{eff} doit être basé sur la contrainte de compression $\sigma_{com,Ed}$ la plus élevée s'exerçant dans la paroi concernée (calculée sur la base de la section transversale efficace et tenant compte d'éventuels effets de second ordre), lorsque la résistance de la section transversale est atteinte.

(4) Si $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1}$, il convient d'obtenir le coefficient de réduction ρ de la façon suivante :

- si $\overline{\lambda}_p \leq 0{,}673$: $\rho = 1{,}0$ ... (4.1a)

- si $\overline{\lambda}_p > 0{,}673$: $\rho = (1{,}0 - 0{,}22 / \overline{\lambda}_p) / \overline{\lambda}_p$ ...(4.1b)

avec l'élancement de la paroi $\overline{\lambda}_p$ donné par :

$$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} \cong \frac{b_p}{t}\sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f_{yb}}{\pi^2 E k_\sigma}} \cong 1{,}052\frac{b_p}{t}\sqrt{\frac{f_{yb}}{E k_\sigma}} \cong \frac{b_p / t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \qquad (4.2)$$

où :

k_σ est le coefficient de voilement approprié, pris dans le tableau 4.1 ou 4.2 ;

ε est le rapport $\sqrt{235 / f_{yb}}$ avec f_{yb} en N/mm^2.

(5) Si $\sigma_{com,Ed} < f_{yb} / \gamma_{M1}$, il convient de déterminer le coefficient de réduction ρ de la façon suivante :

- **Alternative 1** : Utiliser les expressions (4.1a) et (4.1b) mais remplacer l'élancement de la paroi $\overline{\lambda}_p$ par l'élancement de la paroi réduit $\overline{\lambda}_{p,red}$ donné par :

$$\overline{\lambda}_{p,red} = \overline{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb} / \gamma_{M1}}} \qquad \text{... (4.3)}$$

- **Alternative 2** : Remplacer les expressions (4.1a) et (4.1b) par les expressions (4.4a) et (4.4b) de la façon suivante :

  - si $\overline{\lambda}_{p,red} \leq 0{,}673$: $\rho = 1{,}0$ ... (4.4a)

  - si $\overline{\lambda}_{p,red} > 0{,}673$:

$$\rho = \frac{1 - 0{,}22 / \overline{\lambda}_{p,red}}{\overline{\lambda}_{p,red}} + 0{,}18\frac{\overline{\lambda}_p - \overline{\lambda}_{p,red}}{\overline{\lambda}_p - 0{,}6} \quad \text{mais} \quad \rho \leq 1{,}0 \qquad \text{... (4.4b)}$$

(6) Pour les largeurs efficaces aux états limites de service, il convient de déterminer ρ de la façon suivante :

- **Alternative 1** : Utiliser les expressions (4.1a) et (4.1b) mais remplacer l'élancement de la paroi $\overline{\lambda}_p$ aux états limites ultimes par l'élancement de la paroi aux états limites de service $\overline{\lambda}_{p,ser}$ donné par :

$$\bar{\lambda}_{p,ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_{yb}}} \qquad \text{... (4.5)}$$

où :

$\sigma_{com,Ed,ser}$ est la contrainte de compression la plus élevée s'exerçant dans la paroi concernée (calculée sur la base de la section transversale efficace) sous l'effet des charges à l'état limite de service.

- **Alternative 2** : Utiliser les expressions (4.4a) et (4.4b) mais remplacer l'élancement de la paroi réduit $\bar{\lambda}_{p,red}$ par l'élancement de la paroi aux états limites de service $\bar{\lambda}_{p,ser}$ obtenu par l'expression (4.5).

(7) Pour la détermination de la largeur efficace d'une paroi de semelle soumise à un gradient de contrainte, le rapport de contraintes ψ utilisé dans les tableaux 4.1 et 4.2 peut être basé sur les caractéristiques le la section transversale brute.

(8) Pour la détermination de la largeur efficace d'une paroi d'âme, le rapport de contraintes ψ utilisé dans le tableau 4.1 peut être obtenu en utilisant l'aire efficace de la semelle comprimée mais l'aire brute de l'âme.

(9) Les caractéristiques de section efficace peuvent éventuellement être affinées en répétant (7) et (8) de manière itérative, mais en utilisant la section transversale efficace déjà trouvée à la place de la section transversale brute.

(10) Dans le cas d'âmes de plaques nervurées soumises à un gradient de contraintes, on peut utiliser la méthode simplifiée donnée en 4.3.4.

4.3 Parois munies de raidisseurs de bord ou intermédiaires

4.3.1 Généralités

(0)P **A** Dans le cas d'une paroi munie d'un raidisseur de bord et d'un raidisseur intermédiaire, il y a lieu de négliger le raidisseur intermédiaire.

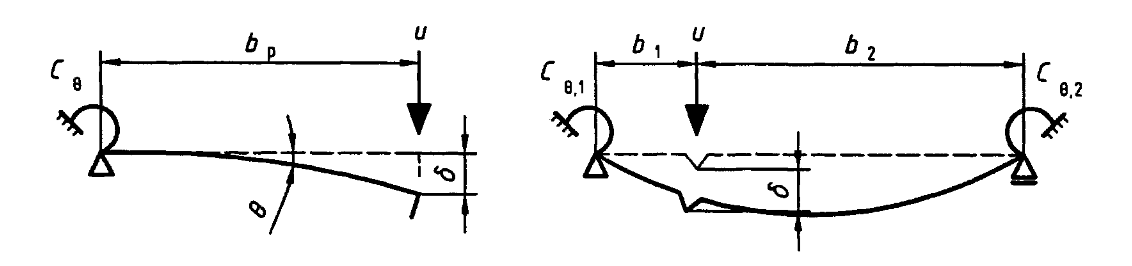
(1)P Le calcul des parois comprimées munies de raidisseurs de bord ou intermédiaires doit être basé sur l'hypothèse selon laquelle le raidisseur se comporte comme une barre comprimée avec un maintien partiel continu, dont la rigidité élastique dépend des conditions aux limites et de la rigidité de flexion des parois adjacentes.

(2) Il convient de déterminer la rigidité du support élastique d'un raidisseur par l'application d'une charge unitaire par unité de longueur u comme illustré sur la figure 4.1. La rigidité élastique K par unité de longueur peut être déterminée par :

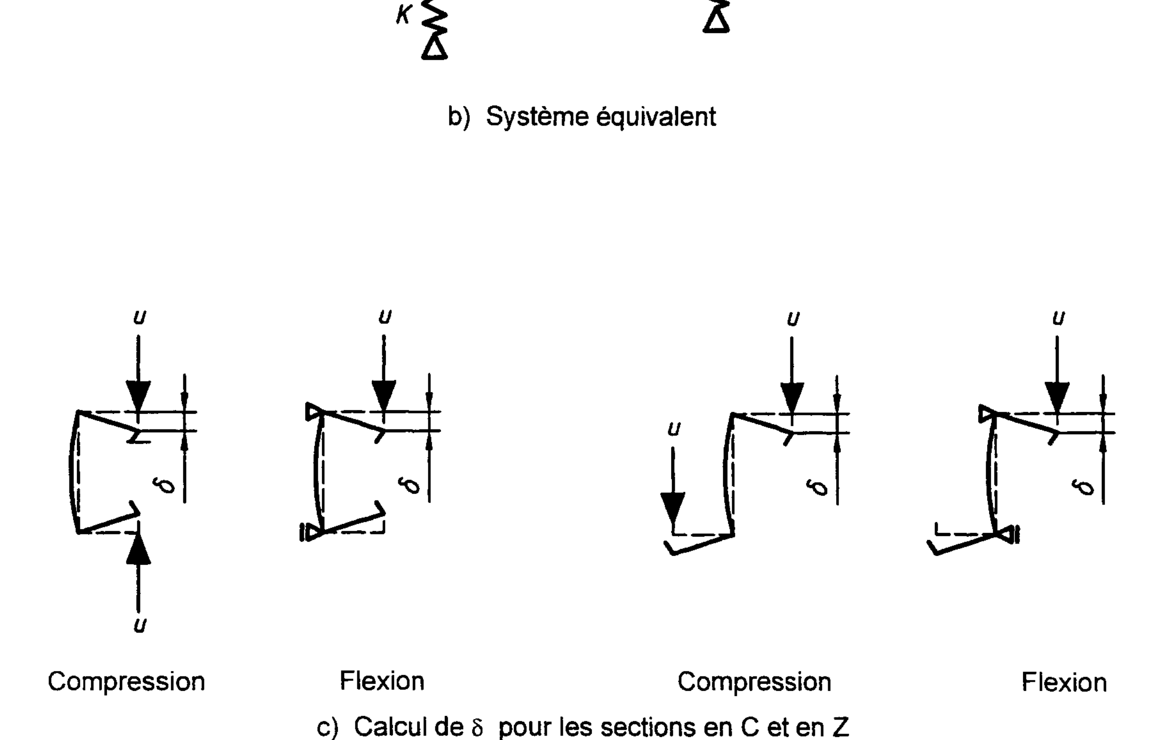
$$K = u / \delta \qquad \text{... (4.6)}$$

où :

δ est la flèche du raidisseur sous l'effet de la charge unitaire u.



a) Système réel



b) Système équivalent

c) Calcul de δ pour les sections en C et en Z

Figure 4.1 : Détermination de la rigidité du support élastique

(3) Pour la détermination des valeurs des rigidités élastiques en rotation C_θ, $C_{\theta,1}$ et $C_{\theta,2}$ à partir de la géométrie de la section transversale, il convient de tenir compte des effets éventuels d'autres raidisseurs existant sur la même paroi, ou sur toute autre paroi comprimée de la section transversale.

(3) **C**	Les rigidités élastiques en rotation C_θ, $C_{\theta,1}$ et $C_{\theta,2}$ sont illustrées par la figure 4.1.

(4) Pour un raidisseur de bord, il convient d'obtenir la flèche δ par :

$$\delta = \theta b_p + \frac{u b_p^3}{3} \text{ x } \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \qquad \text{... (4.7)}$$

avec :

$\theta = u b_p / C_\theta$

(5) Dans le cas des raidisseurs de bord de profils en C à bords tombés et de profils en Z à bords tombés, il convient de déterminer C_θ avec les charges unitaires u appliquées comme indiqué sur la figure 4.1(c).

(5) **A** D'autres applications (formes de section différentes ou sollicitations différentes) peuvent être traitées de manière équivalente.

(6) Pour un raidisseur intermédiaire, une alternative plaçant du côté de la sécurité peut consister à prendre les valeurs de rigidités élastiques en rotation $C_{\theta,1}$ et $C_{\theta,2}$ égales à zéro, et la flèche δ peut être obtenue par :

$$\delta = \frac{ub_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \times \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \qquad \text{... (4.8)}$$

(7) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ pour la résistance au flambement par flexion d'un raidisseur conformément au 6.2.1(2)P à l'aide de la courbe de flambement a_0 (facteur d'imperfection α = 0,13) pour l'élancement relatif $\bar{\lambda}$ d'après :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} \qquad \text{... (4.9)}$$

où :

$\sigma_{cr,s}$ est la contrainte critique élastique pour le raidisseur d'après 4.3.2, 4.3.3 ou 4.3.4.

(7) **A** Si $\sigma_{com,Ed} < f_{yb}/\gamma_{M1}$ il convient de remplacer l'élancement relatif $\bar{\lambda}$ par l'élancement relatif réduit $\bar{\lambda}_{red}$ donné par :

$$\bar{\lambda}_{red} = \bar{\lambda} \times \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb} / \gamma_{M1}}}$$

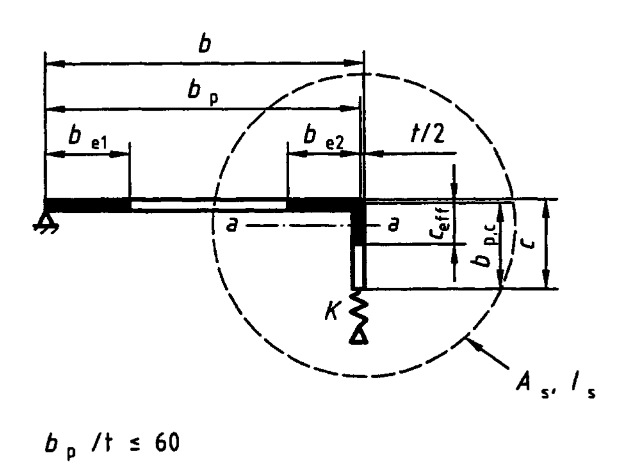
4.3.2 Parois munies de raidisseurs de bord

4.3.2.1 Conditions

(1) Un raidisseur de bord peut être à simple pli, ou à double pli, comme illustré sur la figure 4.2.

(2)P Un raidisseur de bord ne doit être pris en compte pour la détermination de la résistance des parois dont il fait partie, que si les conditions ci-après sont satisfaites :

- l'angle entre le raidisseur et la paroi n'est pas inférieur à 45 ° ni supérieur à 135 ° ;
- le débord c n'est pas inférieur à 0,2 b_p , avec b_p et c tels qu'indiqué sur la figure 4.2 ;
- le rapport b_p / t n'est pas supérieur à 60 pour un raidisseur de bord à simple pli, ou à 90 pour un raidisseur de bord à double pli.



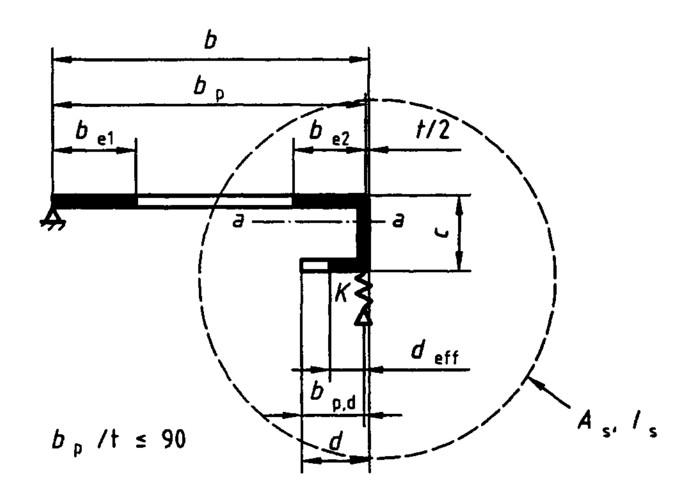


Figure 4.2 : Raidisseurs de bord

(3) Si les critères exposés en (1) et (2)P sont satisfaits, l'efficacité du raidisseur peut être déterminée à partir de l'une des deux méthodes suivantes :

- la méthode générale donnée en 4.3.2.2 ;

- la méthode simplifiée donnée en 4.3.2.3.

4.3.2.2 Méthode générale

(1) Il convient de prendre en compte comme section transversale d'un raidisseur de bord les parties efficaces du raidisseur, paroi *c* ou parois *c* et *d* comme indiqué sur la figure 4.2, augmentées de la partie efficace adjacente de la paroi plane b_p.

(2) Il convient d'appliquer la méthode, illustrée par la figure 4.3, en suivant les étapes ci-après :

- **Etape 1** : Obtenir une section transversale efficace initiale pour le raidisseur à l'aide des largeurs efficaces déterminées en considérant que le raidisseur confère un maintien total et que $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1}$, voir (3) à (5).

- **Etape 2** : Utiliser la section transversale efficace initiale du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction pour le flambement par flexion, en tenant compte des effets du maintien élastique continu, voir (6) et (7).

- **Etape 3** : Procéder par itération pour affiner la valeur du coefficient de réduction pour le flambement du raidisseur, voir (8) et (9).

(2) **A**	Dans la procédure, on peut prendre en considération la valeur réelle de $\sigma_{com,Ed}$ lorsque $\sigma_{com,Ed} < f_{yb}/\gamma_{M1}$.

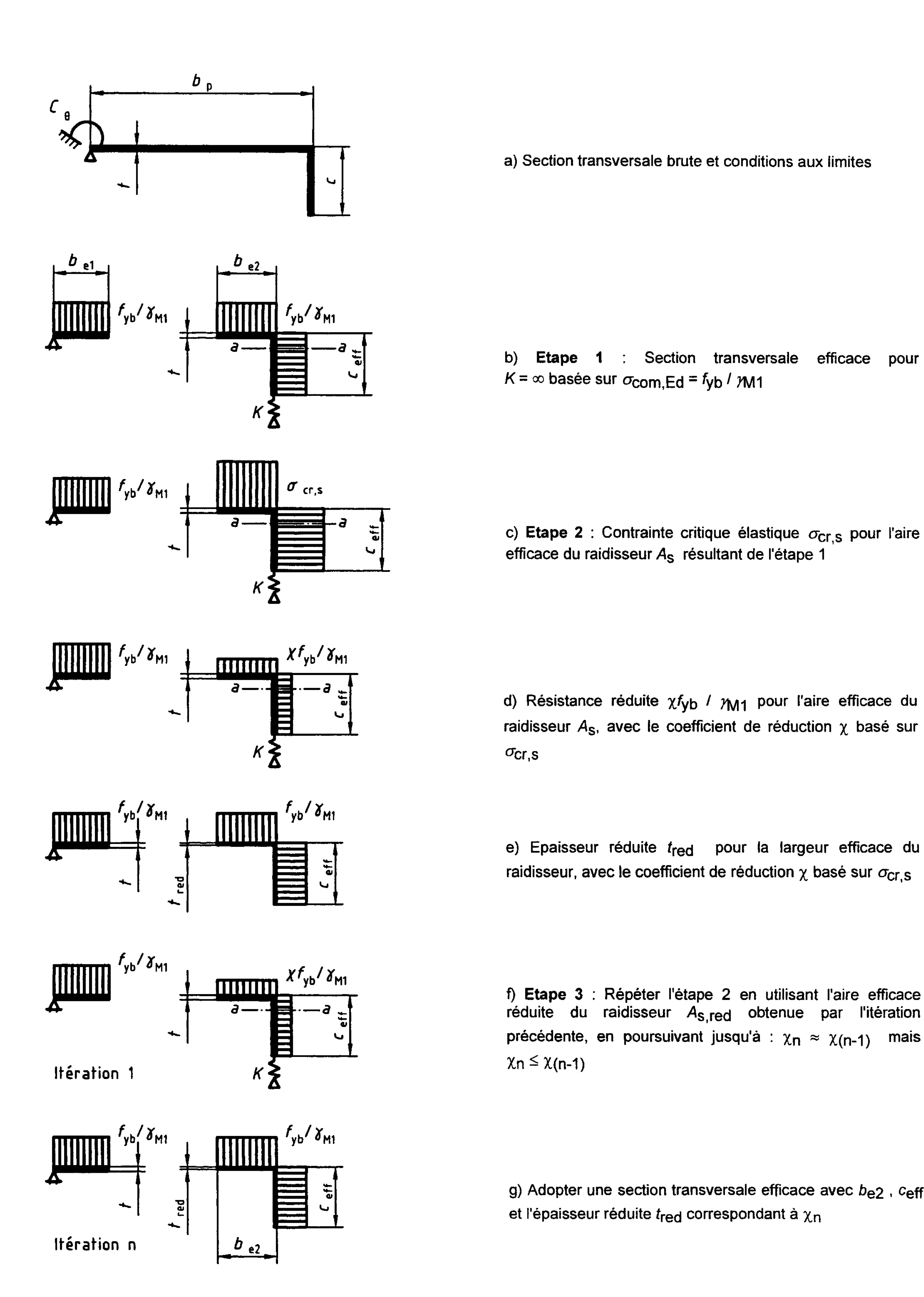


Figure 4.3 : Résistance à la compression d'une semelle munie d'un raidisseur de bord

(3) Il convient de déterminer les valeurs initiales des largeurs efficaces b_{e1} et b_{e2} indiquées sur la figure 4.2 à partir de l'article 4.2 en prenant pour hypothèse que la paroi b_p est une paroi sur deux appuis, voir tableau 4.1.

(4) Il convient d'obtenir les valeurs initiales des largeurs efficaces c_{eff} et d_{eff} indiquées sur la figure 4.2 de la façon suivante :

a) pour un raidisseur de bord à simple pli :

$$c_{eff} = \rho b_{p,c} \quad \text{... (4.10a)}$$

avec ρ obtenu d'après 4.2(4), en utilisant une valeur du coefficient de voilement k_σ donnée par les expressions suivantes :

- si $b_{p,c} / b_p \leq 0{,}35$:

$$k_\sigma = 0{,}5 \quad \text{... (4.10b)}$$

- si $0{,}35 < b_{p,c} / b_p \leq 0{,}6$:

$$k_\sigma = 0{,}5 + 0{,}83 \times \sqrt[3]{(b_{p,c} / b_p - 0{,}35)^2} \quad \text{... (4.10c)}$$

b) pour un raidisseur de bord à double pli :

$$c_{eff} = \rho b_{p,c} \quad \text{... (4.10d)}$$

avec ρ obtenu d'après 4.2(4), avec un coefficient de voilement k_σ pour une paroi sur deux appuis pris dans le tableau 4.1 ;

$$d_{eff} = \rho b_{p,d} \quad \text{... (4.10e)}$$

avec ρ obtenu d'après 4.2(4), avec un coefficient de voilement k_σ pour une paroi en console pris dans le tableau 4.2 ;

(5) Il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace du raidisseur de bord A_s par :

$$A_s = t\,(b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) \quad \text{... (4.11)}$$

(5) I Il convient de déterminer l'aire A_s de section transversale efficace du raidisseur de bord, en tenant compte de sa géométrie réelle et des largeurs efficaces b_{e2}, c_{eff} et d_{eff} comme indiqué en 4.3.2.2 (3) et (4).

(6) Il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ pour un raidisseur de bord par :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2.\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad \text{... (4.12)}$$

où :

K est la rigidité du support élastique par unité de longueur, voir 4.3.1(2) ;

I_s est le moment d'inertie de la section efficace d'aire A_s du raidisseur, par rapport à l'axe centroïde a - a de sa section transversale efficace, voir figure 4.2.

(7) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ pour la résistance au flambement par flexion d'un raidisseur de bord à partir de la valeur de $\sigma_{cr,s}$ par la méthode donnée en 4.3.1(7).

(8) Si χ < 1, on peut éventuellement l'affiner par itération, en commençant avec des valeurs modifiées de ρ obtenues à l'aide de 4.2(5) avec $\sigma_{com,Ed}$ égal à $\chi f_{yb}/\gamma_{M1}$, de telle sorte que :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi} \quad \text{... (4.13)}$$

(9) Si cette itération est effectuée, il convient de la poursuivre jusqu'à ce que la valeur courante de χ soit approximativement égale à la valeur précédente, mais sans la dépasser.

(10) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par flexion, égale à :

$$A_{s,red} = \chi A_s \left[\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}\right] \quad \text{avec } A_{s,red} \leq A_s \quad \text{... (4.14)}$$

dans laquelle $\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte calculée à l'axe du raidisseur.

(10) I Clause sans objet.

(11) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\, A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(11) I Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$.

(12) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

(12) I Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.3.2.2 (2) avec son amendement pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

4.3.2.3 Méthode simplifiée

(1) Comme alternative à la méthode générale donnée en 4.3.2.2, on peut utiliser la méthode simplifiée suivante pour déterminer l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ d'un raidisseur de bord comme illustré par la figure 4.2.

(2) Il convient de calculer l'aire de section transversale efficace du raidisseur de bord A_s par l'expression

$$A_s = t\,(b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) \quad \text{... (4.15)}$$

dans laquelle il convient de déterminer les largeurs efficaces b_{e2}, c_{eff} et d_{eff} comme indiqué en 4.3.2.2(3) et (4), en calculant ρ selon 4.2(5) avec $\sigma_{com,Ed}$ égal à $\chi f_{yb} / \gamma_{M1}$, ce qui conduit à :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi} \quad \text{... (4.16)}$$

(2) I Il convient de calculer l'aire A_s de section transversale efficace du raidisseur de bord en tenant compte de sa géométrie réelle et des largeurs efficaces b_{e2}, c_{eff} et d_{eff} comme indiqué en 4.3.2.2(3) et (4), en calculant ρ selon 4.2(5) avec $\sigma_{com,Ed}$ égal à $\chi f_{yb} / \gamma_{M1}$, ce qui conduit à :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi}$$

(3) Le coefficient de réduction χ peut être pris égal à 0,5 si :

$I_s \geq 0{,}31\ (1{,}5 + h / b_p)(f_{yb} / E)^2 (b_p / t)^3 A_s^2$ ... (4.17)

sinon, le coefficient de réduction χ peut être pris approximativement égal à 1,0 si

$I_s \geq 4{,}86\ (1{,}5 + h / b_p)(f_{yb} / E)^2 (b_p / t)^3 A_s$ ... (4.18)

(3) I Le coefficient de réduction χ peut être pris égal si :

- 0 si $I_s < 0{,}31\ (1{,}5 + h / b_p)(f_{yb} / E)^2 (b_p / t)^3 A_s^2$
- 0,5 si $0{,}31\ (1{,}5 + h/b_p)(f_{yb}/E)^2 (b_p/t)^3 A_s^2 \leq I_s < 4{,}86\ (1{,}5 + h/b_p)(f_{yb}/E)^2 (b_p/t)^3 A_s^2$
- 1,0 si $I_s \geq 4{,}86\ (1{,}5 + h / b_p)(f_{yb} / E)^2 (b_p / t)^3 A_s^2$

où :

b_p est la largeur de référence de la paroi en console, voir figure 4.2 ;

h est la hauteur hors-tout de l'âme adjacente ;

I_s est le moment d'inertie de la section efficace d'aire A_s du raidisseur de bord par rapport à l'axe centroïde a-a de sa section transversale efficace, voir figure 4.2.

(4) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par flexion, égale à :

$$A_{s,red} = \chi A_s \left[\frac{f_{yb} / \gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}\right] \quad \text{avec } A_{s,red} \leq A_s \qquad \text{... (4.19)}$$

dans laquelle $\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte calculée à l'axe du raidisseur

(4) I Clause sans objet.

(5) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\, A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(5) I Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$.

(6) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t pour toutes les valeurs de I_s.

(6) I Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.3.2.2 (2) avec son amendement pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

4.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires

C Ce paragraphe ne concerne que les parois appuyées sur les deux bords.

4.3.3.1 Conditions

(1) Les raidisseurs intermédiaires peuvent être formés par des plis.

(2) Il convient que les raidisseurs soient de forme similaire, et que leur nombre ne soit pas supérieur à deux.

(3) Si les critères exposés en (1) et (2) sont satisfaits, l'efficacité du raidisseur peut être déterminée à l'aide de l'une des deux méthodes suivantes :

- la méthode générale donnée en 4.3.3.2 ;
- la méthode simplifiée donnée en 4.3.3.3.

4.3.3.2 Méthode générale

(1) Il convient de considérer que la section transversale d'un raidisseur intermédiaire comprend le raidisseur lui-même et les parties efficaces adjacentes des parois adjacentes $b_{p,1}$ et $b_{p,2}$ comme indiqué sur la figure 4.4.

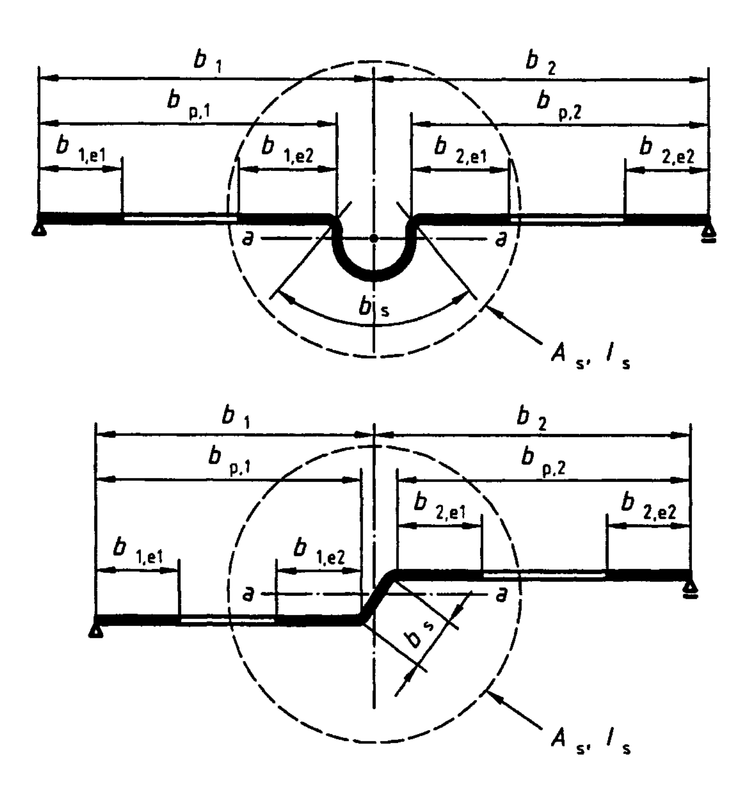


Figure 4.4 : Raidisseurs intermédiaires

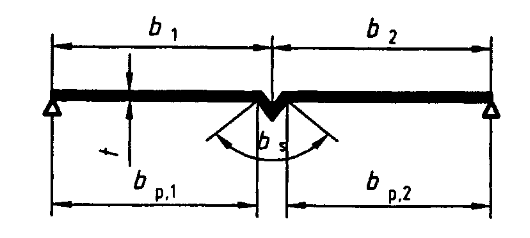
(2) Il convient d'appliquer la méthode illustrée par la figure 4.5, en suivant les étapes suivantes :

- **Etape 1** : Obtenir une section transversale efficace initiale pour le raidisseur à l'aide des largeurs efficaces déterminées en considérant que le raidisseur confère un maintien total et que $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M1}$, voir (3) et (4).

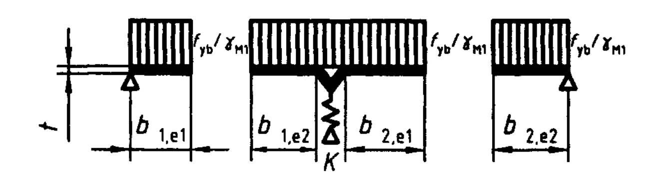
- **Etape 2** : Utiliser la section transversale efficace initiale du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction pour le flambement par flexion, en tenant compte des effets du maintien élastique continu, voir (5) et (6).

- **Etape 3** : Procéder par itération pour affiner la valeur du coefficient de réduction pour le flambement du raidisseur, voir (7) et (8).

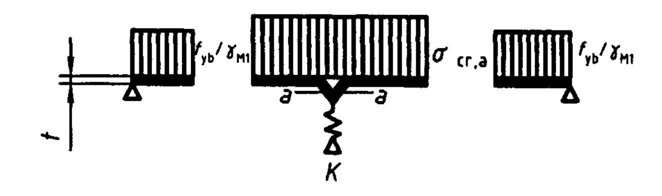
(2) **A**	Dans la procédure, on peut prendre en considération la valeur réelle de $\sigma_{com,Ed}$, lorsque $\sigma_{com,Ed} < f_{yb}/\gamma_{M1}$.



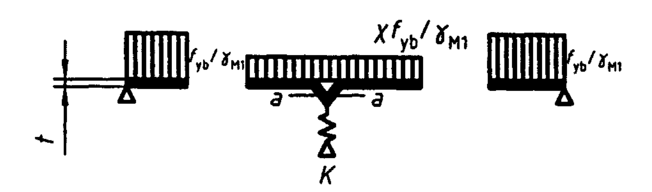
a) Section transversale brute et conditions aux limites



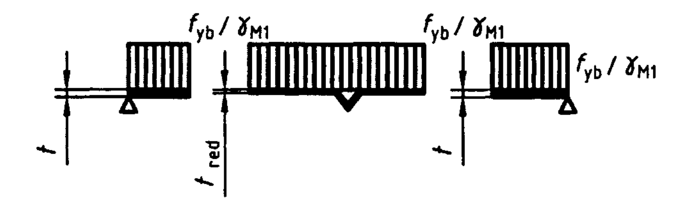
b) **Etape 1** : Section transversale efficace pour $K = \infty$ basée sur $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M1}$



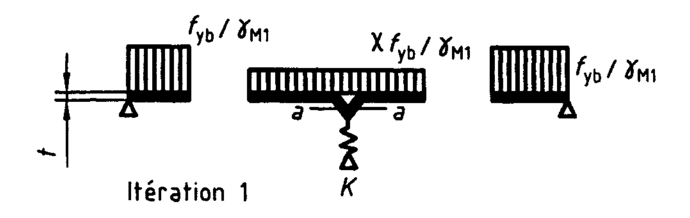
c) **Etape 2** : Contrainte critique élastique $\sigma_{cr,s}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s résultant de l'étape 1



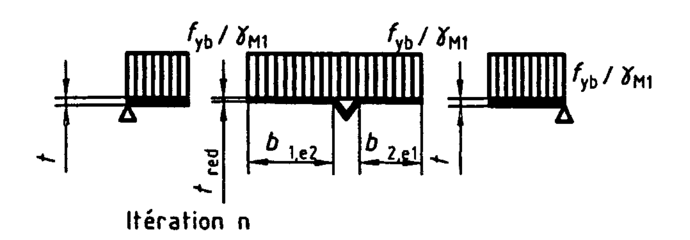
d) Résistance réduite $\chi f_{yb} / \gamma_{M1}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s, avec le coefficient de réduction χ basé sur $\sigma_{cr,s}$



e) Epaisseur réduite t_{red} pour la largeur efficace du raidisseur, avec le coefficient de réduction χ basé sur $\sigma_{cr,s}$



f) **Etape 3** : Répéter l'étape 2 en utilisant l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ obtenue par l'itération précédente, en poursuivant jusqu'à : $\chi_n \approx \chi_{(n-1)}$ mais $\chi_n \leq \chi_{(n-1)}$



g) Adopter une section transversale efficace avec $b_{1,e2}$, $b_{2,e1}$ et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à χ_n

Figure 4.5 : Résistance à la compression d'une semelle munie d'un raidisseur intermédiaire

(3) Il convient de déterminer les valeurs initiales des largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ indiquées sur la figure 4.4 à l'aide de l'article 4.2 en prenant pour hypothèse que les parois $b_{p,1}$ et $b_{p,2}$ sont des parois sur deux appuis, voir tableau 4.1.

(4) Il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire A_s par l'expression :

$$A_s = t\,(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s) \qquad \text{... (4.20)}$$

dans laquelle la largeur de raidisseur b_s est telle qu'indiquée sur la figure 4.4.

(4) I Il convient de déterminer l'aire A_s de section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire en tenant compte de sa géométrie réelle, des largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ comme indiquées au 4.3.3.2 (3) et de la largeur du raidisseur b_s comme illustrée par la figure 4.4.

(5) Il convient de déterminer la contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s}$ pour un raidisseur intermédiaire par :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \qquad \text{... (4.21)}$$

où :

K est la rigidité élastique par unité de longueur, voir 4.3.1(2) ;

I_s est le moment d'inertie de la section efficace d'aire A_s du raidisseur par rapport à l'axe centroïde a - a de sa section transversale efficace, voir figure 4.2.

(6) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ pour la résistance au flambement par flexion d'un raidisseur intermédiaire d'après la valeur de $\sigma_{cr,s}$ par la méthode donnée en 4.3.1(7).

(7) Si $\chi < 1$, on peut éventuellement l'affiner par itération, en commençant cette itération avec des valeurs modifiées de ρ obtenues à l'aide de 4.2(5) avec $\sigma_{com,Ed}$ égal à $\chi f_{yb}/\gamma_{M1}$, de telle sorte que :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi} \qquad \text{... (4.22)}$$

(8) Si cette itération est effectuée, il convient de la poursuivre jusqu'à ce que la valeur courante de χ soit approximativement égale à la valeur précédente, mais sans la dépasser.

(9) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par flexion, égale à :

$$A_{s,red} = \chi A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}} \text{ avec } A_{s,red} \leq A_s \qquad \text{... (4.23)}$$

dans laquelle $\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte calculée à l'axe du raidisseur

(9) I Clause sans objet.

(10) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\,A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(10) I Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$

(11) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

(11) I Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.3.3.2 (2) avec son amendement pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

4.3.3.3 Méthode simplifiée

(1) Comme alternative à la méthode générale donnée en 4.3.3.2, on peut utiliser la méthode simplifiée suivante pour déterminer l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ d'un raidisseur intermédiaire comme illustré par la figure 4.4.

(2) Il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire A_s par l'expression :

$$A_s = t\,(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s) \qquad \text{... (4.24)}$$

dans laquelle les largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ ainsi que la largeur du raidisseur b_s sont comme indiquées sur la figure 4.4.

(2) I Il convient de déterminer l'aire A_s de section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire en tenant compte de sa géométrie réelle, des largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ comme indiquées en 4.3.3.3 (3) et de la largeur du raidisseur b_s comme illustrée par la figure 4.4.

(3) Il convient de déterminer les largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ d'après 4.2 avec un coefficient de voilement k_σ pour une paroi sur deux appuis pris dans le tableau 4.1, en utilisant une valeur de ρ obtenue d'après 4.2(5) avec $\sigma_{com,Ed}$ égal à $\chi f_{yb} / \gamma_{M1}$, de telle sorte que :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi} \qquad \text{... (4.25)}$$

(4) Le coefficient de réduction χ peut être pris égal à 0,5 si :

$$I_s \geq 0{,}016\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2 \qquad \text{... (4.26)}$$

sinon, le coefficient de réduction χ peut être pris approximativement égal à 1,0 si :

$$I_s \geq 0{,}24\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2 \qquad \text{... (4.27)}$$

(4) I Le coefficient de réduction χ peut être pris égal à

- 0 si $I_s < 0{,}016\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2$

- 0,5 si $0{,}016\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2 \leq I_s < 0{,}24\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2$

- 1,0 si $I_s \geq 0{,}24\ (f_{yb} / E)^2\ (b_o / t)^3 A_s^2$

où :

$b_o = b_1 + b_2$ (voir figure 4.4) ;

I_s est le moment d'inertie de la section efficace d'aire A_s du raidisseur par rapport à l'axe centroïde a - a de sa section transversale efficace, voir figure 4.2.

(5) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par flexion, égale à

$$A_{s,red} = \chi A_s \left[\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}} \right] \quad \text{avec } A_{s,red} \leq A_s \qquad \text{... (4.28)}$$

dans laquelle $\sigma_{com,\,Ed}$ est la contrainte calculée à l'axe du raidisseur

(5) I Clause sans objet

(6) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\, A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(6) I Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$

(7) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t pour toutes les valeurs de I_s.

(7) I Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.3.3.2 (2) avec son amendement pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

4.3.4 Plaques nervurées avec raidisseurs intermédiaires

C Dans ce paragraphe, le terme "plaques nervurées" vise des plaques dont les nervures sont de forme trapézoïdale et l'on utilise le terme "plage" pour désigner une plage proprement dite et un sommet de nervures de plaques.

4.3.4.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser le présent paragraphe 4.3.4 pour les plaques nervurées, en association avec 4.3.2 pour les plages munies de raidisseurs intermédiaires et avec 4.3.3 pour les âmes munies de raidisseurs intermédiaires.

(1) I Il convient d'utiliser le présent paragraphe 4.3.4 pour les plaques nervurées, en association avec l'article 4.2.

(2) Il convient également de prendre en compte l'interaction entre le flambement des raidisseurs intermédiaires de plage et des raidisseurs d'âme à l'aide de la méthode donnée en 4.3.4.4.

4.3.4.2 Plages munies de raidisseurs intermédiaires

(1) Dans le cas où elle est soumise à une compression uniforme, il convient de considérer la section transversale efficace d'une plage munie de raidisseurs intermédiaires comme composée des aires efficaces réduites $A_{s,red}$ de deux raidisseurs intermédiaires au maximum, et de deux bandes d'une largeur de 0,5 b_{eff} adjacentes aux âmes, voir figure 4.6.

(1) **C** b_{eff} est déterminé par application de l'article 4.2.

(2) Pour un raidisseur unique de plage central, il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ par l'expression suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2\, k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4 b_p{}^2 (2 b_p + 3 b_s)}} \qquad \text{... (4.29)}$$

où :

b_p est la largeur de référence de la paroi, comme indiqué sur la figure 4.6 ;

b_s est la largeur développée du raidisseur, voir figure 4.6 ;

k_w est le coefficient tenant compte du maintien partiel en rotation de la plage raidie, par les âmes ou par les autres parois adjacentes, voir (5) et (6) ;

et A_s et I_s sont tels que définis en 4.3.3.2.

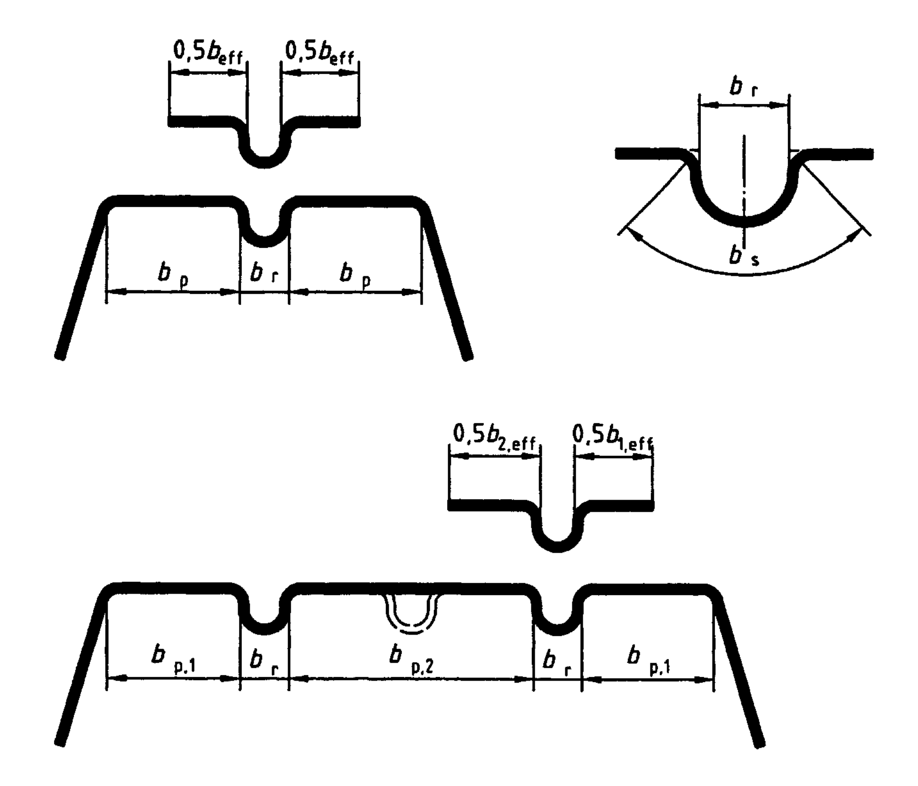


Figure 4.6 : Plage comprimée munie d'un, deux ou trois raidisseurs

(3) Pour deux raidisseurs de plage placés symétriquement, il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ par l'expression suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2 k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8 b_1^{\,2} (3 b_e - 4 b_1)}} \qquad \text{... (4.30)}$$

avec :

$b_e = 2 b_{p,1} + b_{p,2} + 2 b_s$

$b_1 = b_{p,1} + 0{,}5\, b_r$

où :

$b_{p,1}$ est la largeur de référence d'une paroi extérieure, comme indiqué sur la figure 4.6 ;

$b_{p,2}$ est la largeur de référence de la paroi centrale, comme indiqué sur la figure 4.6 ;

b_r est la largeur hors-tout d'un raidisseur, voir figure 4.6.

(4) Dans le cas où il existe trois raidisseurs, il convient de considérer celui du milieu comme inefficace.

(5) La valeur de k_w peut être calculée à partir de la longueur d'onde ℓ_b de flambement de la plage comprimée de la façon suivante :

- si $\ell_b/s_w \geq 2$:

$$k_w = k_{wo} \qquad \text{... (4.31a)}$$

- si $\ell_b/s_w < 2$:

$$k_w = k_{wo} - (k_{wo} - 1)\left[2\,\ell_b / s_w - (\ell_b / s_w)^2\right] \qquad \text{... (4.31b)}$$

où :

s_w est la largeur de l'âme, voir figure 3.3(c).

(6) Comme alternative plaçant du côté de la sécurité, le coefficient de maintien en rotation k_w peut être pris égal à 1,0 correspondant à une condition d'appui articulé.

(7) Les valeurs de ℓ_b et de k_{wo} peuvent être déterminées à partir des expressions suivantes :

- pour une plage comprimée munie d'un seul raidisseur intermédiaire :

$$\ell_b = 3{,}07\sqrt[4]{I_s b_p{}^2 (2b_p + 3b_s)/t^3} \qquad \text{... (4.32)}$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0{,}5b_d}} \qquad \text{... (4.33)}$$

avec

$b_d = 2b_p + b_s$

- pour une plage comprimée munie de deux ou trois raidisseurs intermédiaires :

$$\ell_b = 3{,}65\sqrt[4]{I_s b_1{}^2 (3be - 4b_1)/t^3} \qquad \text{... (4.34)}$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3be - 4b_1)}} \qquad \text{... (4.35)}$$

(8) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement, égale à :

$$A_{s,red} = \chi A_s \qquad \text{... (4.36)}$$

(8) I Clause sans objet.

(9) Si les âmes ne sont pas raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ directement d'après $\sigma_{cr,s}$ par la méthode donnée en 4.3.1(7).

(10) Si les âmes comportent des raidisseurs intermédiaires, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ par la méthode donnée en 4.3.1(7), mais avec la contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{cr,mod}$ donnée en 4.3.4.4.

(11) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(11) I Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$.

(12) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

(12) I Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.2 (6) pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

4.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires

(1) Il convient de considérer la section transversale efficace de la zone comprimée d'une âme (ou autre paroi d'une section transversale soumise à un gradient de contraintes) comme composée des aires efficaces réduites $A_{s,red}$ de deux raidisseurs intermédiaires au plus, d'une bande adjacente à la plage comprimée, et d'une bande adjacente à l'axe des centres de gravité de la section transversale efficace, voir figure 4.7.

(2) Il convient de considérer que la section transversale efficace d'une âme telle qu'illustrée par la figure 4.7 comprend :

a) une bande de largeur $s_{eff,1}$ adjacente à la plage comprimée ;

b) l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ de chaque raidisseur d'âme, en considérant deux raidisseurs au maximum ;

c) une bande de largeur $s_{eff,n}$ adjacente à l'axe centroïde de la section efficace ;

d) la partie tendue de l'âme.

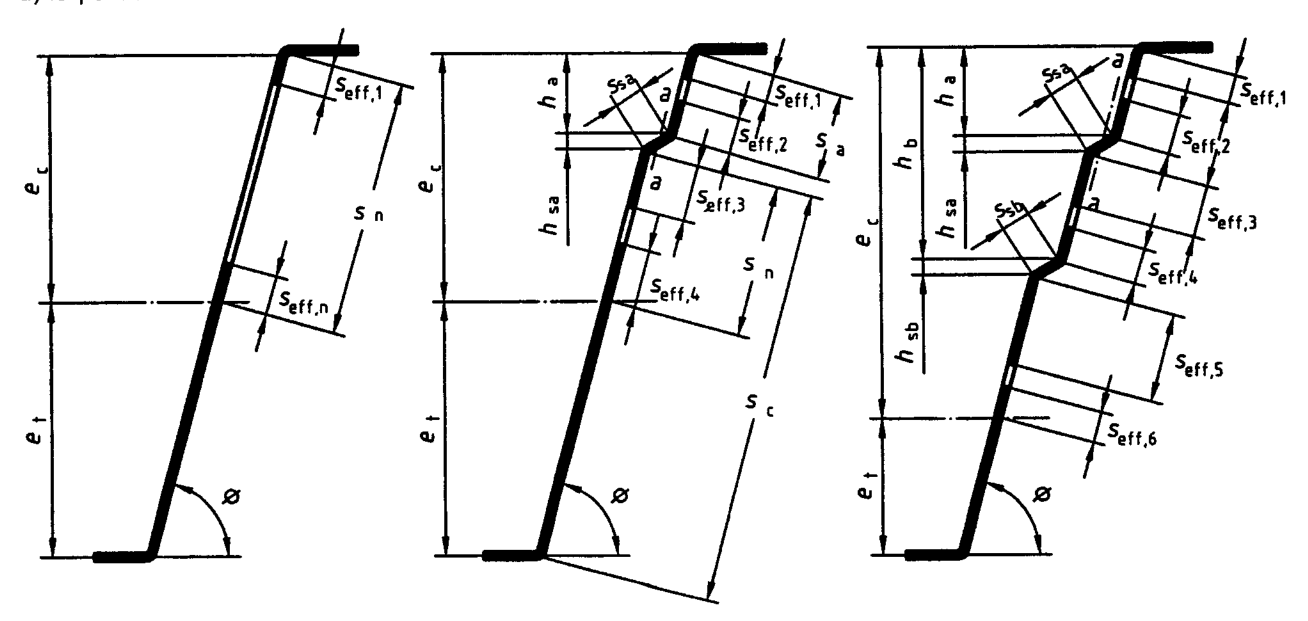


Figure 4.7 : Sections transversales efficaces d'âmes de plaques nervurées

(3) Il convient de déterminer les aires efficaces des raidisseurs de la façon suivante :

- pour un raidisseur unique, ou pour le raidisseur le plus proche de la semelle comprimée :

$$A_{sa} = t(s_{eff,2} + s_{eff,3} + s_{sa}) \quad \text{... (4.37)}$$

- pour un deuxième raidisseur :

$$A_{sb} = t(s_{eff,4} + s_{eff,5} + s_{sb}) \quad \text{... (4.38)}$$

dans lesquelles les dimensions $s_{eff,1}$ à $s_{eff,n}$, s_{sa} et s_{sb} sont indiquées sur la figure 4.7.

(3) I Il convient de déterminer les aires efficaces des raidisseurs A_{sa} (aire d'un raidisseur unique ou du raidisseur le plus proche de l'aire comprimée) et A_{sb} (aire du deuxième raidisseur), en tenant compte de leur géométrie réelle et des dimensions $s_{eff,2}$, $s_{eff,3}$ et s_{sa} pour un raidisseur unique, $s_{eff,2}$ à $s_{eff,5}$, s_{sa} et s_{sb} pour deux raidisseurs, comme illustré par la figure 4.7.

(4) Il convient, dans un premier temps, de baser la position de l'axe centroïde de la section efficace sur les sections transversales efficaces des plages et les sections transversales totales des âmes. Il convient ensuite de déterminer la largeur efficace de base $s_{eff,0}$ par :

$$s_{eff,0} = 0,76\, t \sqrt{E/(\gamma_{M1} \sigma_{com,Ed})} \quad \text{... (4.39)}$$

où :

$\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte dans la plage comprimée lorsque la résistance de la section transversale est atteinte.

(5) Si l'âme n'est pas pleinement efficace, il convient de déterminer les dimensions comme suit :

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} \quad \text{... (4.40a)}$$

$$s_{eff,2} = (1 + 0,5\, h_a / e_c)\, s_{eff,0} \quad \text{... (4.40b)}$$

$$s_{eff,3} = [1 + 0,5\, (h_a + h_{sa}) / e_c]\, s_{eff,0} \quad \text{... (4.40c)}$$

$$s_{eff,4} = (1 + 0,5\, h_b / e_c)\, s_{eff,0} \quad \text{... (4.40d)}$$

$$s_{eff,5} = [1 + 0,5\, (h_b + h_{sb}) / e_c]\, s_{eff,0} \quad \text{... (4.40e)}$$

$$s_{eff,n} = 1,5\, s_{eff,0} \quad \text{... (4.40f)}$$

où :

e_c est la distance entre l'axe centroïde de la section efficace et la ligne d'épure de la plage comprimée, voir figure 4.7 ;

et les dimensions h_a , h_b , h_{sa} et h_{sb} sont telles qu'indiquées sur la figure 4.7.

(6) Après avoir déterminé les dimensions $s_{eff,1}$ à $s_{eff,n}$, d'après (5), il convient de les corriger si la paroi concernée est pleinement efficace, à l'aide des indications suivantes :

- dans une âme non raidie, si $s_{eff,1} + s_{eff,n} \geq s_n$ la totalité de l'âme est efficace, donc corriger ainsi :

$$s_{eff,1} = 0,4\, s_n \quad \text{... (4.41a)}$$

$$s_{eff,n} = 0,6\, s_n \quad \text{... (4.41b)}$$

- dans une âme raidie, si $s_{eff,1} + s_{eff,2} \geq s_a$ la totalité de s_a est efficace, donc corriger ainsi :

$$s_{eff,1} = s_a / (2 + 0,5\, h_a / e_c) \qquad \text{... (4.42a)}$$

$$s_{eff,2} = s_a (1 + 0,5\, h_a / e_c) / (2 + 0,5\, h_a / e_c) \qquad \text{... (4.42b)}$$

- dans une âme munie d'un seul raidisseur, si $s_{eff,3} + s_{eff,n} \geq s_n$ la totalité de s_n est efficace, donc corriger ainsi :

$$s_{eff,3} = s_n [1 + 0,5(h_a + h_{sa})/ e_c] / [2,5 + 0,5\, (h_a + h_{sa}) / e_c] \qquad \text{... (4.43a)}$$

$$s_{eff,n} = 1,5\, s_n / [2,5 + 0,5\, (h_a + h_{sa}) / e_c] \qquad \text{... (4.43b)}$$

- dans une âme munie de deux raidisseurs :

  - si $s_{eff,3} + s_{eff,4} \geq s_b$ la totalité de s_b est efficace, donc corriger ainsi :

$$s_{eff,3} = s_b [1 + 0,5(h_a + h_{sa})/ e_c] / [2 + 0,5\, (h_a + h_{sa} + h_b) / e_c] \qquad \text{... (4.44a)}$$

$$s_{eff,4} = s_b (1 + 0,5\, h_b / e_c) / [2 + 0,5\, (h_a + h_{sa} + h_b) / e_c] \qquad \text{... (4.44b)}$$

  - si $s_{eff,5} + s_{eff,n} \geq s_n$ la totalité de s_n est efficace, donc corriger ainsi :

$$s_{eff,5} = s_n [1 + 0,5(h_b + h_{sb})/ e_c] / [2,5 + 0,5\, (h_b + h_{sb}) / e_c] \qquad \text{... (4.45a)}$$

$$s_{eff,n} = 1,5\, s_n / [2,5 + 0,5\, (h_b + h_{sb}) / e_c] \qquad \text{... (4.45b)}$$

(7) Pour un raidisseur unique, ou pour le raidisseur le plus proche de la plage comprimée dans les âmes avec deux raidisseurs, il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,sa}$ par l'expression suivante :

$$\sigma_{cr,sa} = \frac{1{,}05 k_f E \sqrt{I_s t^3 s_1}}{A_{sa} s_2 (s_1 - s_2)} \qquad \text{... (4.46a)}$$

dans laquelle s_1 est donnée ainsi :

- pour un raidisseur unique :

$$s_1 = 0,9\, (s_a + s_{sa} + s_c) \qquad \text{... (4.46a)}$$

- pour le raidisseur le plus proche de la plage comprimée, dans les âmes avec deux raidisseurs :

$$s_1 = s_a + s_{sa} + s_b + 0,5\, (s_{sb} + s_c) \qquad \text{... (4.46c)}$$

avec :

$$s_2 = s_1 - s_a - 0,5\, s_{sa} \qquad \text{... (4.46d)}$$

où :

k_f est le coefficient tenant compte du maintien partiel en rotation de l'âme raidie, par les plages ;

I_s est le moment d'inertie de la section efficace d'une section transversale de raidisseur comprenant la largeur de pli s_{sa} et deux bandes adjacentes, chacune d'une longueur $s_{eff,1}$, par rapport à son axe centroïde parallèle aux parois d'âme, voir figure 4.8. Pour le calcul de I_s, on peut négliger la différence éventuelle de pente entre les parois d'âme de part et d'autre du raidisseur.

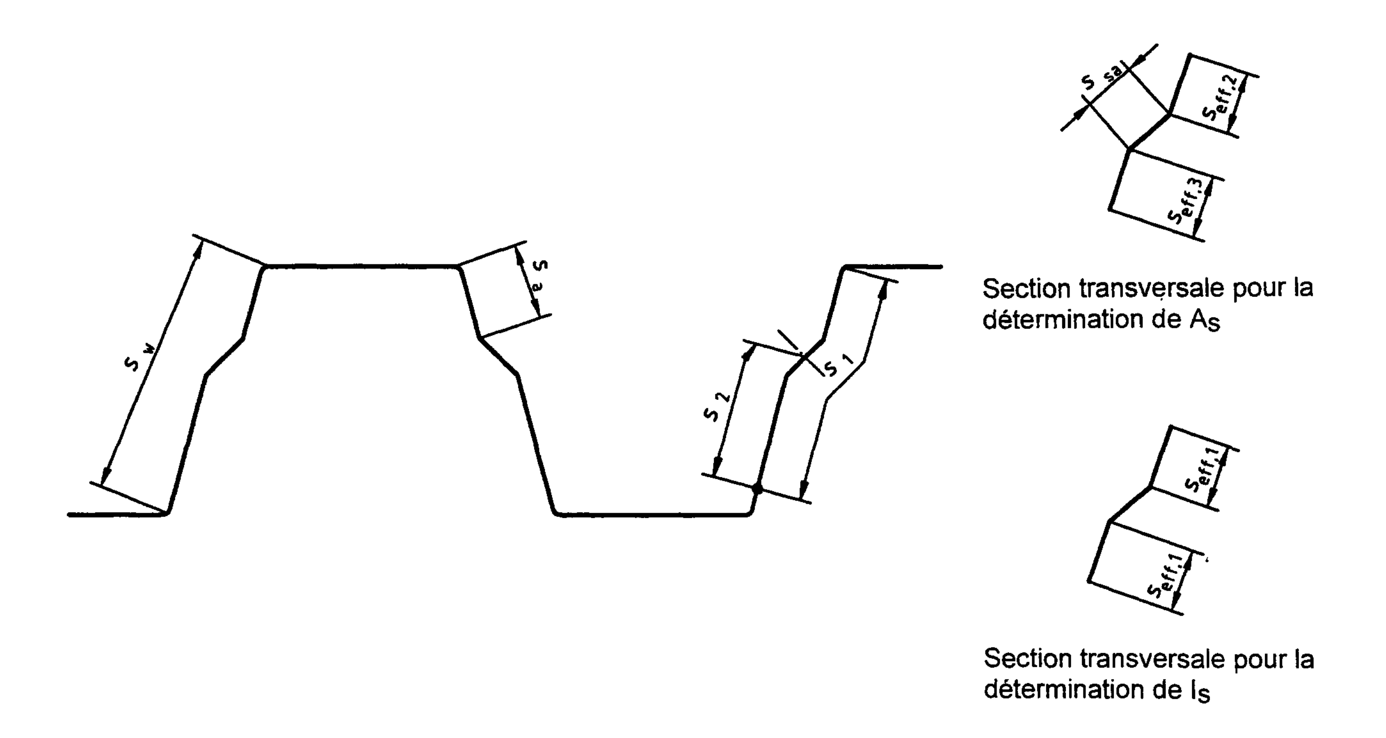


Figure 4.8 : Raidisseurs d'âmes de plaques nervurées

(8) En l'absence d'étude plus détaillée, le coefficient de maintien en rotation k_f peut être pris, en se plaçant du côté de la sécurité, égal à 1,0 correspondant à une condition d'appui articulé.

(9) Pour un raidisseur unique comprimé, ou pour le raidisseur le plus proche de la plage comprimée dans les âmes munies de deux raidisseurs, il convient de déterminer l'aire efficace réduite $A_{sa,red}$ à partir de

$$A_{sa,red} = \chi \, A_{sa} \, / \, [1 - (h_a + 0,5 \, h_{sa}) \, / \, e_c] \quad \text{mais } A_{sa,red} \leq A_{sa} \qquad \ldots (4.47)$$

(10) Si les plages ne sont pas raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ directement à partir de $\sigma_{cr,sa}$ à l'aide de la méthode donnée en 4.3.1(7).

(11) Si les plages comportent des raidisseurs, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ par la méthode donnée en 4.3.1(7), mais avec la contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{cr,mod}$ donnée en 4.3.4.4.

(12) Pour un raidisseur unique tendu, il convient de prendre l'aire efficace réduite $A_{sa,red}$ égale à A_{sa}.

(13) Pour les âmes munies de deux raidisseurs, il convient de prendre l'aire efficace réduite $A_{sb,red}$ du second raidisseur, égale à A_{sb} .

(14) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(14) **I** Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de représenter les caractéristiques réduites du raidisseur par le biais d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi t$.

(15) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

(15) **I** Il convient d'utiliser la procédure définie au 4.2 (6) pour le calcul des caractéristiques de section efficace aux états limites de service.

De manière alternative, on peut baser cette détermination sur la section efficace totale du raidisseur.

(16) Eventuellement, les caractéristiques de section efficace peuvent être affinées de manière itérative en basant la position de l'axe centroïde de la section efficace sur les sections transversales efficaces des âmes déterminées par l'itération précédente et sur les sections transversales efficaces des plages déterminées à l'aide de l'épaisseur réduite t_{red} pour toutes les parois incluses dans les aires de raidisseur de plage A_s. Il convient de baser cette itération sur une largeur efficace de base augmentée $s_{eff,0}$ obtenue par :

$$s_{eff,0} = 0{,}95 t \sqrt{E / (\gamma_{M1} \sigma_{com,Ed})} \qquad \text{... (4.48)}$$

4.3.4.4 Plaques munies de raidisseurs de plage et de raidisseurs d'âme

(1) Dans le cas de plaques munies de raidisseurs intermédiaires dans les plages et dans les âmes, voir figure. 4.9, il convient de prendre en compte l'interaction entre le flambement par flexion des raidisseurs de plages et des raidisseurs d'âmes en utilisant une contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{cr,mod}$ pour les deux types de raidisseurs, obtenue par :

$$\sigma_{cr,mod} = \frac{\sigma_{cr,sa}}{\left[(\sigma_{cr,sa} / \sigma_{cr,s})^4 + (1 - (h_a + 0{,}5 h_{sa}) / e_c)^4 \right]^{0,25}} \qquad \text{... (4.49)}$$

où :

$\sigma_{cr,s}$ est la contrainte critique élastique pour un raidisseur intermédiaire de plage, voir 4.3.4.2(2) pour une plage avec un seul raidisseur ou 4.3.4.2(3) pour une plage munie de deux raidisseurs ;

$\sigma_{cr,sa}$ est la contrainte critique élastique pour un seul raidisseur d'âme, ou pour le raidisseur le plus proche de la plage comprimée dans les âmes munies de deux raidisseurs, voir 4.3.4.3(7).

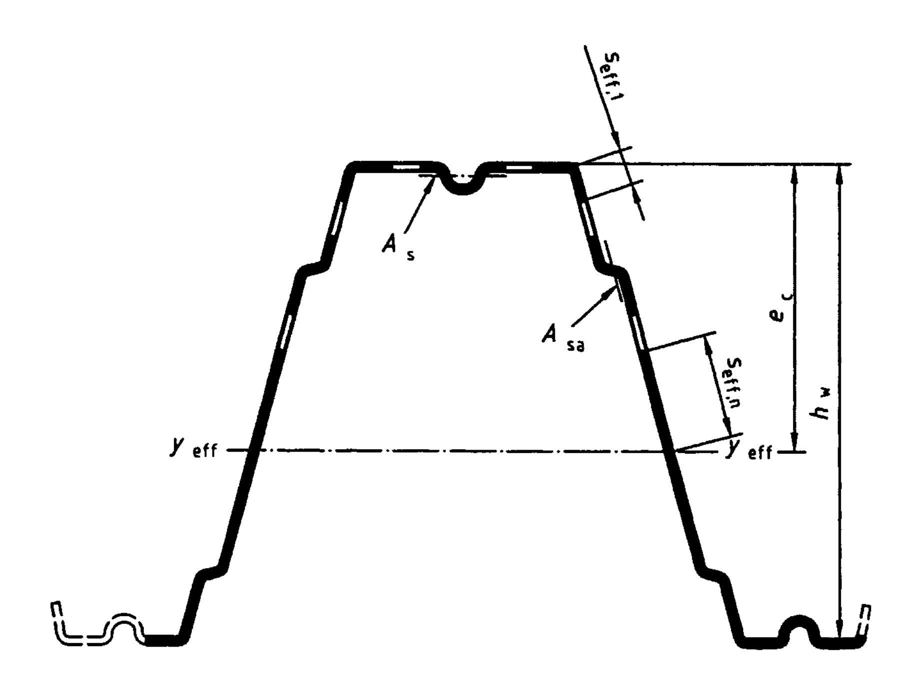


Figure 4.9 : Plaque nervurée munie de raidisseurs de plage et de raidisseurs d'âme

5. Résistance des sections transversales

C	Les sections 4, 5 et 6 s'inscrivent dans la perspective d'une justification par calculs.

5.1 Généralités

(1)P Les valeurs de calcul des forces et moments internes au droit de chaque section transversale ne doivent pas être supérieures aux valeurs de calcul des résistances correspondantes.

(2)P La résistance de calcul d'une section transversale doit être déterminée soit par calcul, à l'aide des méthodes données dans la présente section 5, soit par dimensionnement assisté par des essais conformément à la section 9.

(3)P Pour le dimensionnement par calcul, la résistance de la section transversale doit être déterminée pour :

- la traction axiale, comme spécifié en 5.2 ;
- la compression axiale, comme spécifié en 5.3 ;
- le moment fléchissant, comme spécifié en 5.4 ;
- la combinaison de moment fléchissant et de traction axiale, comme spécifié en 5.5 ;
- la combinaison de moment fléchissant et de compression axiale, comme spécifié en 5.6 ;
- le moment de torsion, comme spécifié en 5.7 ;
- l'effort tranchant, comme spécifié en 5.8 ;
- les charges transversales localisées, comme spécifié en 5.9 ;
- la combinaison de moment fléchissant et d'effort tranchant, comme spécifié en 5.10 ;
- la combinaison de moment fléchissant et de charges transversales localisées, comme spécifié en 5.11.

(4) Le dimensionnement assisté par des essais peut être utilisé au lieu du dimensionnement par calcul pour l'une quelconque des résistances ci-dessus.

NOTE Le dimensionnement assisté par des essais est susceptible d'être avantageux, en particulier, pour les sections transversales présentant des rapports b_p/t relativement élevés, par exemple, en relation avec le comportement inélastique, l'enfoncement local de l'âme ou le traînage de cisaillement.

(5)P Pour le dimensionnement par calcul, les effets du voilement local doivent être pris en compte par l'utilisation de caractéristiques de section efficace déterminées comme spécifié à la section 4.

(6)P La résistance des barres au flambement doit être vérifiée comme spécifié à la section 6.

(7)P Les effets d'instabilité globale de la structure doivent être pris en compte comme spécifié dans l'ENV 1993-1-1.

(8)P Pour les barres dont les sections transversales sont déformables dans leur plan, on doit tenir compte du flambement latéral possible des semelles comprimées et d'une flexion latérale des semelles en général, voir 6.4.

(8)P C	L'article 6.4 ne traite que du flambement latéral des parois. Pour ce qui concerne la flexion latérale des semelles, l'article 10.1 donne une solution particulière pour les poutres maintenues par des plaques.

5.2 Traction axiale

(1)P La résistance de calcul à la traction d'une section transversale $N_{t,Rd}$ doit être déterminée par :

$$N_{t,Rd} = f_{ya} A_g / \gamma_{M0} \quad \text{mais } N_{t,Rd} \leq F_{n,Rd} \qquad \text{... (5.1)}$$

où :

A_g est l'aire brute de la section transversale ;

$F_{n,Rd}$ est la résistance de section nette d'après 8.4 pour le type approprié de fixation mécanique ;

f_{ya} est la limite d'élasticité moyenne, voir 3.1.2.

(2) Il convient de déterminer la résistance à la traction d'une cornière assemblée par une seule aile, ou d'autres types de profilés assemblés par l'intermédiaire d'éléments excentrés, comme spécifié dans l'ENV 1993-1-1.

5.3 Compression axiale

(1)P La résistance de calcul à la compression d'une section transversale $N_{c,Rd}$ doit être déterminée de la façon suivante :

- si son aire efficace A_{eff} est inférieure à son aire brute A_g :

$$N_{c,Rd} = f_{yb} A_{eff} / \gamma_{M1} \quad \text{... (5.2a)}$$

- si son aire efficace A_{eff} est égale à son aire brute A_g :

$$N_{c,Rd} = f_{ya} A_g / \gamma_{M0} \quad \text{... (5.2b)}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale, obtenue d'après la section 4 en prenant pour hypothèse une contrainte de compression uniforme $\sigma_{com,Ed}$ égale à f_{yb}/γ_{M1} ;

f_{ya} est la limite d'élasticité moyenne, voir 3.1.2 ;

f_{yb} est la limite d'élasticité de base.

(2)P L'effort axial interne dans une barre doit être pris comme agissant au niveau du centre de gravité de sa section transversale brute.

(3)P L'effort résistant d'une section transversale à la compression axiale doit être considéré comme agissant au niveau du centre de gravité de sa section transversale efficace. Si ce dernier ne coïncide pas avec le centre de gravité de sa section transversale brute, le déplacement e_N des axes centroïdes (voir figure 5.1) doit être pris en compte en utilisant la méthode donnée en 5.6.

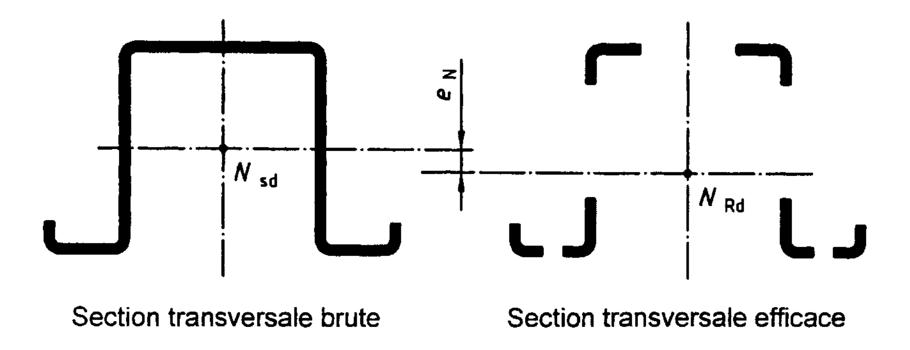


Figure 5.1 : Section transversale efficace en compression

5.4 Moment fléchissant

5.4.1 Généralités

(1)P Le moment résistant d'une section transversale soumise à flexion selon un axe principal doit être obtenu de la façon suivante :

- si le module élastique de la section efficace W_{eff} est inférieur au module élastique de la section brute W_{el} :

$$M_{c,Rd} = f_y\, W_{eff}/\gamma_{M1} \qquad \text{... (5.3a)}$$

- si le module élastique de la section efficace W_{eff} est égal au module élastique de la section brute W_{el} :

$$M_{c,Rd} = f_{ya}\, W_{el}/\gamma_{M0} \qquad \text{... (5.3b)}$$

où :

f_y est la limite d'élasticité telle que définie en 3.1.1(6)P.

(2)P Le module élastique de la section efficace W_{eff} doit être basé sur une section transversale efficace soumise uniquement à un moment fléchissant selon l'axe principal concerné, avec une contrainte maximale $\sigma_{max,Ed}$ égale à f_{yb}/γ_{M1}, en tenant compte des effets du voilement local comme spécifié à la section 4. Lorsque le traînage de cisaillement intervient, on doit également prendre en compte ses effets comme spécifié en 5.4.3.

(3) Le rapport de contraintes $\psi = \sigma_1/\sigma_2$ utilisé pour la détermination des parties efficaces de l'âme peut être obtenu en utilisant l'aire efficace de la semelle comprimée et, en revanche, l'aire brute de l'âme, voir figure 5.2.

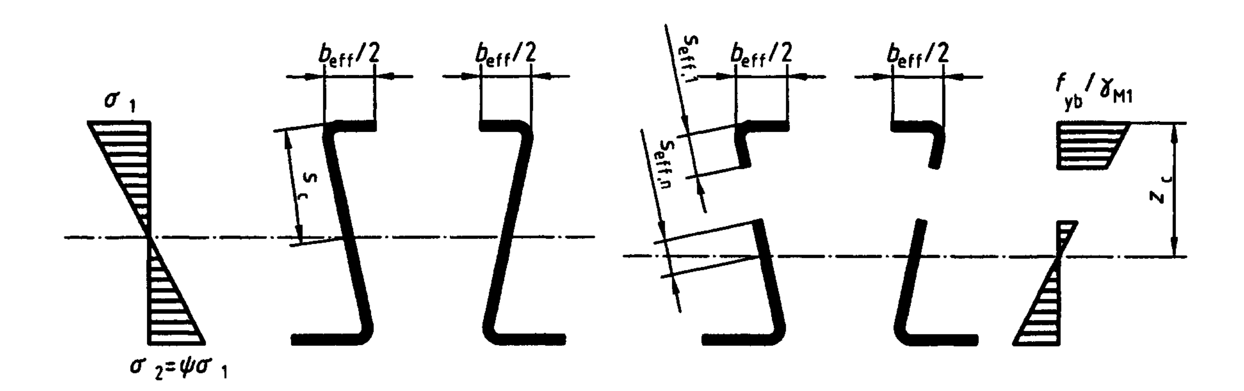


Figure 5.2 : Section transversale efficace pour la résistance aux moments fléchissants

(4)P Si la plastification survient en premier lieu au niveau de la fibre extrême comprimée de la section transversale, la valeur de W_{eff} doit être basée sur une répartition linéaire des contraintes dans la section transversale, à moins que les conditions énoncées en 5.4.2(5)P soient satisfaites.

(5)P Pour la flexion biaxiale, le critère suivant doit être satisfait :

$$M_{y,Sd} / M_{cy,Rd} + M_{z,Sd} / M_{cz,Rd} \leq 1 \qquad \text{... (5.4)}$$

où :

$M_{y,Sd}$ est le moment fléchissant appliqué autour de l'axe principal de forte inertie ;

$M_{z,Sd}$ est le moment fléchissant appliqué autour de l'axe principal de faible inertie ;

$M_{cy,Rd}$ est la résistance de la section transversale supposée uniquement soumise à un moment autour de l'axe y-y ;

$M_{cz,Rd}$ est la résistance de la section transversale supposée uniquement soumise à un moment autour de l'axe z-z.

5.4.2 Résistance plastique partielle

(1)P A condition que le moment fléchissant soit appliqué uniquement autour d'un seul axe principal de la section transversale, et à condition que la plastification survienne en premier lieu au niveau de la fibre extrême tendue, on peut utiliser des réserves plastiques dans la zone tendue sans limite de déformation jusqu'à ce que la contrainte de compression maximale $\sigma_{com,Ed}$ atteigne f_{yb}/γ_{M1}.

(2) Dans ce cas, il convient de baser le module partiellement plastique de la section efficace $W_{pp,eff}$ sur une répartition des contraintes bilinéaire dans la zone tendue mais linéaire dans la zone comprimée.

(3) En l'absence d'une analyse plus détaillée, la largeur efficace b_{eff} d'une paroi soumise à un gradient de contrainte peut être obtenue à l'aide de 4.2 en basant b_c sur la répartition bilinéaire des contraintes, mais en négligeant la forme de la répartition des contraintes pour la détermination de ψ.

(4) Si l'analyse globale plastique prend en compte une redistribution des moments fléchissants, il convient de démontrer, à partir de résultats d'essais conduits conformément à la section 9, que les conditions données en 7.2 sont satisfaites.

(5)P On peut également utiliser des réserves plastiques dans la zone comprimée, jusqu'au niveau de déformation spécifié en (6)P, à condition que toutes les conditions suivantes soient satisfaites :

a) Le moment fléchissant est appliqué uniquement selon un seul des axes principaux de la section transversale ;

b) La barre n'est pas soumise à une torsion, ni sujette au flambement par torsion ou par flexion-torsion, ni sujette au déversement ;

c) La déformation transversale des parties comprimées de la section transversale est évitée ;

d) L'angle entre une âme quelconque et la verticale n'est pas supérieur à 30° ;

(5)P I d) L'angle entre une âme quelconque et le plan de flexion n'est pas supérieur à 30° ;

e) La largeur s_c de la partie comprimée de l'âme satisfait la condition suivante :

$$s_c / t \leq 1{,}11 \sqrt{E / f_{yb}} \quad [\cong 33{,}18\,\varepsilon] \qquad \text{... (5.5)}$$

(6)P La déformation par compression $\varepsilon_{com,Ed}$ ne doit pas être supérieure à $C_y \varepsilon_y / \gamma_{M1}$, où $\varepsilon_y = f_{yb}/E$, voir figure 5.3, et le coefficient C_y est obtenu de la façon suivante :

- pour les parois comprimées sur deux appuis sans raidisseur intermédiaire :

- si $s_c / t \leq 1{,}11 \sqrt{E / f_{yb}} \quad [\cong 33{,}18\,\varepsilon]$:

$C_y = 3$

- si $s_c / t \geq 1{,}29 \sqrt{E / f_{yb}} \quad [\cong 38{,}56\,\varepsilon]$:

$C_y = 1$

- si $1{,}11\sqrt{E / f_{yb}} < s_c / t < 1{,}29\sqrt{E / f_{yb}} \quad [\text{soit si } 33{,}18\,\varepsilon < s_c / t < 38{,}56\,\varepsilon]$:

$$C_y = 3 - \frac{\left((s_c / t)\sqrt{f_{yb} / E} - 1{,}11\right)}{0{,}09} \quad \left[\cong 3 - \frac{(s_c / t - 33{,}18\,\varepsilon)}{2{,}69\,\varepsilon}\right]$$

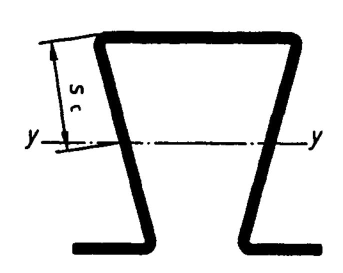
- pour les parois en console :

  $C_y = 1$

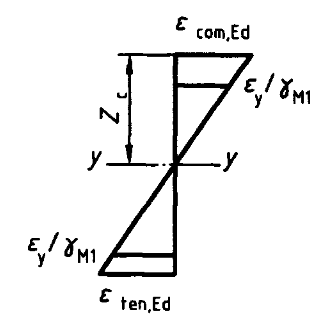
- pour les parois munies de raidisseurs de bord ou intermédiaires :

  $C_y = 1$

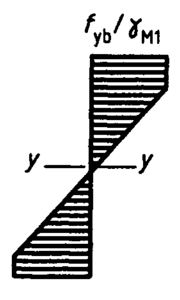
(7) Dans ce cas, il convient de baser le module partiellement plastique W_{pp} sur une distribution bilinéaire des contraintes à la fois dans la zone tendue et dans la zone comprimée, comme indiqué sur la figure 5.3.



Section transversale efficace pour la flexion autour de l'axe y-y



Distribution des déformations pour le calcul $\varepsilon_{com,Ed} \leq C_y \varepsilon_y / \gamma_{M1}$



Distribution des contraintes pour le calcul

Figure 5.3 : Moment résistant partiellement plastique

5.4.3 Effets du traînage de cisaillement

(1)P Les effets du traînage de cisaillement doivent être pris en compte dans les semelles de barres soumises à flexion si la longueur L_m mesurée entre les points de moment nul est inférieure à 20 b_0, où b_0 représente la largeur de semelle contribuant au traînage de cisaillement, comme indiqué sur la figure 5.4.

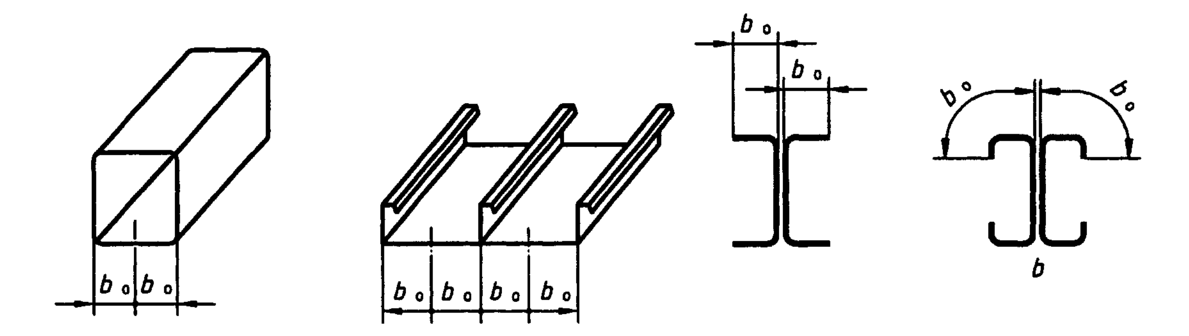


Figure 5.4 : Largeur b_o contribuant au traînage de cisaillement

(2) En l'absence d'informations plus précises, on peut adopter la méthode suivante :

- pour les parois en traction, remplacer b_o par b_{eff} donné par :

$$b_{eff} = \beta_i \, b_o \qquad \text{... (5.6)}$$

- pour les parois comprimées, remplacer le coefficient de réduction ρ pour le voilement local (voir 4.2(4)) par :

$$\rho_L = \beta_i^{\eta} \rho \qquad \text{... (5.7a)}$$

où :

- pour les semelles raidies :

$$\eta = b_o / L_m \qquad \text{... (5.7b)}$$

- pour les semelles non raidies :

$$\eta = (b_o / L_m) / \delta \qquad \text{... (5.7c)}$$

avec :

$$\delta = \frac{2b_o}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}} \cong \frac{b_o / t}{14{,}95\varepsilon} \quad \text{mais} \quad \delta \geq 1{,}0 \qquad \text{... (5.8)}$$

où :

β_i est la valeur appropriée du coefficient de réduction pour le traînage de cisaillement donnée dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Coefficients de réduction β_i pour le traînage de cisaillement

Cas et diagramme des moments	Coefficient de réduction β_i
Moment en travée d'une poutre sur appuis simples ou d'une poutre continue - avec charge uniformément répartie $+$, L_m	pour $b_0 / L_m \geq 1/20$: $\beta_1 = \frac{1}{1+6,4(b_o / L_m)^2}$ pour $b_0 / L_m < 1/20$: $\beta_1 = 1,0$
Appui intermédiaire d'une poutre continue ou en console $-$, L_m	pour $b_0 / L_m \geq 1 / 20$: $\beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 (b_o / L_m) + 1,6 (b_o / L_m)^2}$ pour $b_0 / L_m < 1/50$: $\beta_2 = 1,0$ pour $1/50 \leq b_0 / L_m \leq 1/20$: $\beta_2 = 1,115 - 7,76 (b_0 / L_m)$
Moment en travée d'une poutre sur appuis simples ou d'une poutre continue - avec charge ponctuelle à mi-travée $+$, L_m	pour $b_0 / L_m \geq 1/20$: $\beta_3 = \frac{1}{1 + 4,0 (b_o / L_m) + 3,2 (b_o / L_m)^2}$ pour $b_0 / L_m < 1/50$: $\beta_3 = 1,0$ pour $1/50 \leq b_0 / L_m \leq 1/20$: $\beta_3 = 1,115 - 5,74 (b_0 / L_m)$
Appui de rive d'une poutre	$\beta_0 = (0,55 + 0,025 L_m / b_0)\beta_1$ mais $\beta_0 \leq \beta_1$
Console	$\beta_0 = 1,0$

NOTE Des informations supplémentaires sont données dans l'ENV 1993-2. [2)]

(3) Pour les semelles munies de raidisseurs intermédiaires, il convient de prendre la valeur b_o égale à la moitié de la largeur développée b_d de la paroi raidie, voir figure 5.5.

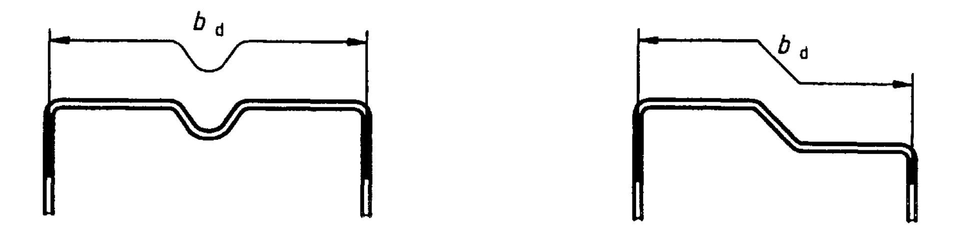
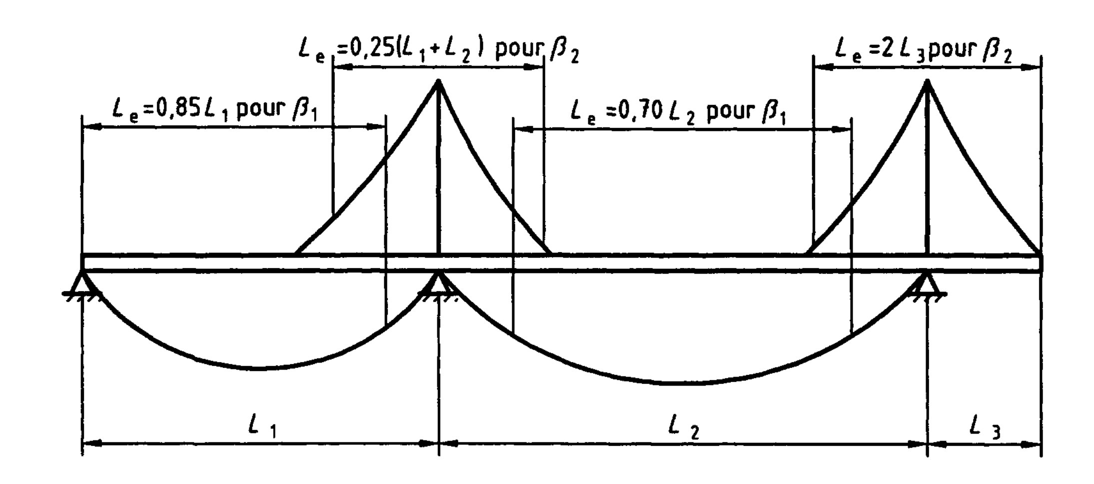


Figure 5.5 : Largeur développée b_d de semelles munies de raidisseurs intermédiaires

[2)] Ce document est en préparation.

(4) Par simplification, dans les poutres continues, les longueurs L_m séparant les points de moment nul peuvent être remplacées par les longueurs efficaces L_e illustrées par la figure 5.6, à condition qu'aucune portée ne soit supérieure à 1,5 fois une portée adjacente, et qu'aucune console ne soit plus longue que la moitié de la portée adjacente.



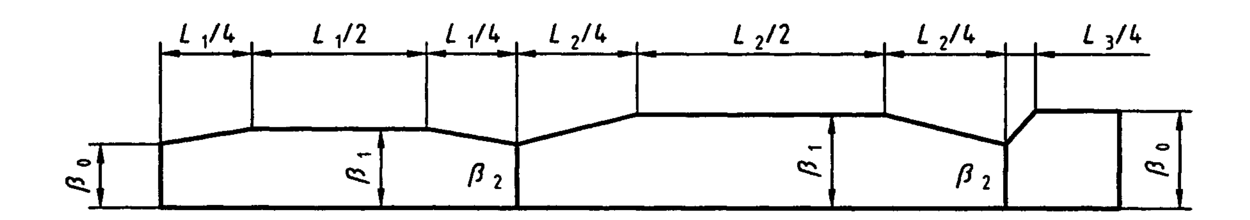


Figure 5.6 : Hypothèses simplifiées pour les poutres continues

5.5 Traction et flexion combinées

(1)P Les sections transversales soumises à une combinaison de traction axiale N_{Sd} et de moments fléchissants $M_{y,Sd}$ et $M_{z,Sd}$ doivent satisfaire le critère suivant :

$$\frac{N_{Sd}}{f_y A_g / \gamma_M} + \frac{M_{y,Sd}}{f_y W_{eff,y,ten} / \gamma_M} + \frac{M_{z,Sd}}{f_y W_{eff,z,ten} / \gamma_M} \leq 1 \qquad (5.9a)$$

où :

$W_{eff,y,ten}$ est le module élastique de la section efficace correspondant à la contrainte de traction maximale lorsque la section est soumise uniquement à un moment autour de l'axe y-y ;

$W_{eff,z,ten}$ est le module élastique de la section efficace correspondant à la contrainte de traction maximale lorsque la section est soumise uniquement à un moment autour de l'axe z-z ;

et $\gamma_M = \gamma_{M0}$ si $W_{eff} = W_{el}$ pour chaque axe autour duquel agit un moment fléchissant, sinon $\gamma_M = \gamma_{M1}$.

(2)P Si $W_{eff,y,ten} \geq W_{eff,y,com}$ ou $W_{eff,z,ten} \geq W_{eff,z,com}$ (où $W_{eff,y,com}$ et $W_{eff,z,com}$ représentent les modules élastiques de section efficace correspondant à la contrainte de compression maximale dans une section transversale efficace qui est soumise uniquement à un moment autour de l'axe approprié), le critère suivant doit également être satisfait :

$$\frac{M_{y,Sd}}{f_y W_{eff,y,com} / \gamma_M} + \frac{M_{z,Sd}}{f_y W_{eff,z,com} / \gamma_M} - \frac{\psi_{vec} N_{Sd}}{f_y A_g / \gamma_M} \leq 1 \quad \text{... (5.9b)}$$

où ψ_{vec} représente le coefficient pour les effets vectoriels défini dans l'ENV 1993-1-1.

5.6 Compression et flexion combinées

(1)P Les sections transversales soumises à une combinaison de compression axiale N_{Sd} et de moments fléchissants $M_{y,Sd}$ et $M_{z,Sd}$ doivent satisfaire le critère suivant :

$$\frac{N_{Sd}}{f_y A_{eff} / \gamma_M} + \frac{M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}}{f_y W_{eff,y,com} / \gamma_M} + \frac{M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}}{f_y W_{eff,z,com} / \gamma_M} \leq 1 \quad \text{... (5.10a)}$$

où A_{eff} est tel que défini en 5.3, $W_{eff,y,com}$ et $W_{eff,z,com}$ sont tels que définis en 5.5 et $\gamma_M = \gamma_{M0}$ si $A_{eff} = A_g$, sinon $\gamma_M = \gamma_{M1}$.

(2)P Les moments additionnels $\Delta M_{y,Sd}$ et $\Delta M_{z,Sd}$ dus aux décalages des axes centroïdes doivent être pris égaux à :

$\Delta M_{y,Sd} = N_{Sd}\, e_{Ny}$

$\Delta M_{z,Sd} = N_{Sd}\, e_{Nz}$

où e_{Ny} et e_{Nz} représentent les décalages des axes centroïdes dans les directions z et y, voir 5.3(3)P.

(2)P C	Voir également figure 6.1 pour la définition des notations employées.

(3)P Si $W_{eff,y,com} \geq W_{eff,y,ten}$ ou $W_{eff,z,com} \geq W_{eff,z,ten}$, le critère suivant doit également être satisfait :

$$\frac{M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}}{f_y W_{eff,y,ten} / \gamma_M} + \frac{M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}}{f_y W_{eff,z,ten} / \gamma_M} - \frac{\psi_{vec} N_{Sd}}{f_y A_g / \gamma_M} \leq 1 \quad \text{... (5.10b)}$$

où $W_{eff,y,ten}$, $W_{eff,z,ten}$ et $_{vec}$ sont tels que définis en 5.5.

5.7 Moment de torsion

(1)P Lorsque des charges sont appliquées de façon excentrée par rapport au centre de cisaillement de la section transversale, les effets de torsion doivent être pris en compte.

NOTE Dans la mesure du possible, il vaut mieux éviter ou réduire les moments de torsion par des maintiens, car ils diminuent considérablement la capacité portante, particulièrement pour des profils ouverts.

(2) Il convient de prendre pour l'axe centroïde et le centre de cisaillement à utiliser pour la détermination des effets du moment de torsion, ceux de la section transversale efficace pour le moment fléchissant résultant de la charge appropriée.

(2) I	Il convient de prendre pour l'axe centroïde et le centre de cisaillement à utiliser pour la détermination des effets du moment de torsion, ceux de la section transversale brute.

(3) Il convient de baser les contraintes normales résultant de l'effort axial N_{Sd} ainsi que des moments fléchissants $M_{y,Sd}$ et $M_{z,Sd}$ sur les sections transversales efficaces respectives utilisées aux articles 5.2 à 5.4. Il convient de baser les contraintes de cisaillement résultant des efforts tranchants, la contrainte de cisaillement résultant de la torsion uniforme (St Venant) et les contraintes normales ainsi que les contraintes de cisaillement résultant de la torsion non uniforme sur les caractéristiques de la section transversale brute.

(4) Dans les sections transversales soumises à la torsion, il convient de satisfaire les conditions suivantes :

$$\sigma_{tot,Ed} \leq f_y/\gamma_M \qquad \text{... (5.11a)}$$

$$\tau_{tot,Ed} \leq (f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0} \qquad \text{... (5.11b)}$$

$$\sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3\tau_{tot,Ed}^2} \leq 1{,}1 f_y/\gamma_M \qquad \text{... (5.11c)}$$

où :

$\sigma_{tot,Ed}$ est la contrainte normale totale, calculée sur la section transversale efficace appropriée ;

(4) C	Conformément au (3), la part due à la torsion non uniforme dans $\sigma_{tot,Ed}$ ($\sigma_{w,Ed}$) est calculée sur la section transversale brute.

$\tau_{tot,Ed}$ est la contrainte totale de cisaillement, calculée sur la section transversale brute ;

et $\gamma_M = \gamma_{M0}$ si $W_{eff} = W_{el}$ pour chaque axe de flexion sinon $\gamma_M = \gamma_{M1}$.

(5) Il convient d'obtenir la contrainte normale totale $\sigma_{tot,Ed}$ ainsi que la contrainte de cisaillement totale $\tau_{tot,Ed}$ de la façon suivante :

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} + \sigma_{w,Ed} \qquad \text{... (5.12a)}$$

$$\tau_{tot,Ed} = \tau_{Vy,Ed} + \tau_{Vz,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed} \qquad \text{... (5.12b)}$$

où :

$\sigma_{My,Ed}$ est la contrainte normale résultant du moment fléchissant $M_{y,Sd}$;

$\sigma_{Mz,Ed}$ est la contrainte normale résultant du moment fléchissant $M_{z,Sd}$;

$\sigma_{N,Ed}$ est la contrainte normale résultant de l'effort axial N_{Sd} ;

$\sigma_{w,Ed}$ est la contrainte normale résultant de la torsion non uniforme ;

$\tau_{Vy,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de l'effort tranchant $V_{y,Sd}$;

$\tau_{Vz,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de l'effort tranchant $V_{z,Sd}$;

$\tau_{t,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de la torsion uniforme (St Venant) ;

$\tau_{w,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de la torsion non uniforme.

5.8 Effort tranchant

(1)P La résistance de l'âme à l'effort tranchant $V_{w,Rd}$ doit être prise égale à la plus petite valeur entre la résistance au voilement de cisaillement $V_{b,Rd}$ et la résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$.

(2) Il convient de vérifier la résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$ dans le cas d'une âme dépourvue de raidisseurs longitudinaux si $s_w / t \leq 72\varepsilon\ (f_{yb} / f_y)\ (\gamma_{M0} / \gamma_{M1})$, ou en général si $\bar{\lambda}_w \leq 0,83\ (f_{yb} / f_y)\ (\gamma_{M0} / \gamma_{M1})$.

(3)P La résistance au voilement de cisaillement $V_{b,Rd}$ doit être déterminée par :

$$V_{b,Rd} = (h_w / \sin \phi)\ t\ f_{bv} / \gamma_{M1} \qquad \text{... (5.13)}$$

où :

f_{bv} est la contrainte limite de résistance au voilement de cisaillement ;

h_w est la hauteur d'âme entre les axes des semelles, voir figure 3.3(c) ;

ϕ est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles.

(4)P La résistance plastique au cisaillement $V_{pl,Rd}$ doit être déterminée par :

$$V_{pl,Rd} = (h_w / \sin \phi)\ t\ (f_y/\sqrt{3}) / \gamma_{M0} \qquad \text{... (5.14)}$$

(5)P La contrainte limite de résistance au voilement de cisaillement f_{bv} pour la valeur appropriée de l'élancement d'âme relatif $\bar{\lambda}_w$ doit être obtenue à partir du tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Contrainte limite de résistance au voilement de cisaillement f_{bv}

Elancement d'âme relatif	Ame sans raidisseur au droit de l'appui	Ame avec raidisseur au droit de l'appui[1)]
$\bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48\ f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48\ f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67\ f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48\ f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
1) Raidisseurs au droit de l'appui, tels que des échantignoles, disposés pour empêcher la déformation de l'âme et calculés pour résister à la réaction d'appui.		

(6)P L'élancement d'âme relatif $\bar{\lambda}_w$ doit être obtenu de la façon suivante :

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_{yb}/\sqrt{3}}{\tau_{cr}}} \cong \frac{b_p}{t}\sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f_{yb}}{\sqrt{3}\ \pi^2 E k_\tau}} \qquad \text{... (5.15a)}$$

- pour les âmes dépourvues de raidisseur longitudinal :

$$\bar{\lambda}_w = 0,346\frac{s_w}{t}\sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \cong \frac{s_w / t}{86,4\varepsilon} \qquad \text{... (5.15b)}$$

- pour les âmes munies de raidisseurs longitudinaux, voir figure 5.7 :

$$\left.\begin{aligned} \bar{\lambda}_w &= 0{,}346\frac{s_d}{t}\sqrt{\frac{5{,}34}{k_\tau}\frac{f_{yb}}{E}} \cong \frac{s_d/t}{86{,}4\varepsilon}\sqrt{\frac{5{,}34}{k_\tau}} \\ \text{mais } \bar{\lambda}_w &\geq 0{,}346\frac{s_p}{t}\sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \cong \frac{s_p/t}{86{,}4\varepsilon} \end{aligned}\right\} \quad \text{....(5.15c)}$$

avec :

$$k_\tau = 5{,}34 + \frac{2{,}10^3}{s_d}\sqrt{\frac{I_s}{s_d}}$$

où :

I_s est le moment d'inertie du raidisseur longitudinal tel que défini en 4.3.4.3(7), selon l'axe a-a comme indiqué sur la figure 5.7 ;

s_d est la largeur développée totale de l'âme, comme indiqué sur la figure 5.7 ;

s_p est la largeur de la plus grande paroi de l'âme, voir figure 5.7 ;

s_w est la largeur de l'âme, comme indiqué sur la figure 5.7, entre les points médians des arrondis, voir figure 3.3(c).

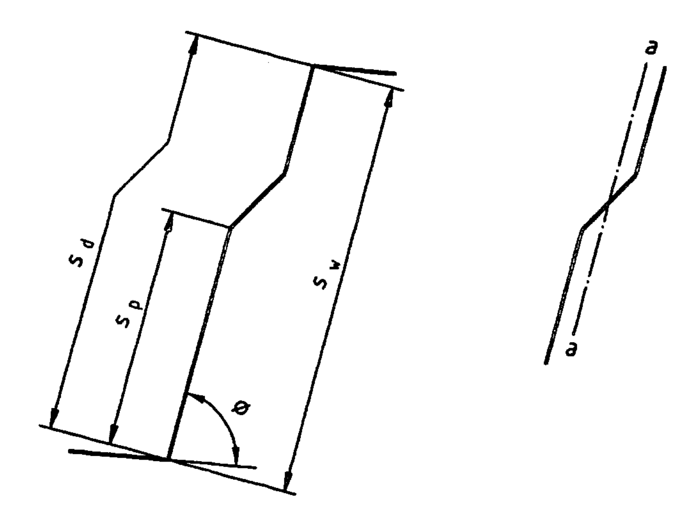


Figure 5.7 : Ame raidie longitudinalement

5.9 Charges transversales localisées

5.9.1 Généralités

(1)P Pour éviter l'écrasement, l'enfoncement local ou le voilement d'une âme soumise à une réaction d'appui ou autre charge transversale localisée appliquée par l'intermédiaire de la semelle, la charge transversale F_{Sd} doit satisfaire :

$$F_{Sd} \leq R_{w,Rd} \qquad \text{... (5.16)}$$

où :

$R_{w,Rd}$ est la résistance transversale locale de l'âme.

(2)P La résistance transversale locale d'une âme $R_{w,Rd}$ doit être obtenue de la façon suivante :

a) pour une âme non raidie :

- pour une section transversale ne comprenant qu'une seule âme : selon 5.9.2 ;
- pour tout autre cas, y compris les plaques : selon 5.9.3 ;

b) pour une âme raidie : selon 5.9.4.

(3) Lorsque la charge locale ou la réaction d'appui est appliquée par l'intermédiaire d'une pièce disposée de sorte à empêcher la déformation de l'âme et calculée pour résister à la charge transversale localisée, la résistance locale de l'âme à la charge transversale n'a pas besoin d'être prise en compte.

(3) **C**	Une échantignole utilisée dans le cas des pannes peut constituer une telle pièce.

4) Dans les poutres présentant une section transversale en I reconstituée à partir de deux profils en U, ou présentant une section transversale similaire dans laquelle deux pièces sont assemblées par leurs âmes, il convient de positionner les liaisons entre les âmes aussi près que possible des semelles de la poutre.

5.9.2 Sections transversales comportant une seule âme non raidie

(1) Pour une section transversale comportant une seule âme non raidie, voir figure 5.8, la résistance transversale locale de l'âme peut être déterminée comme spécifié en (2), à condition que la section transversale satisfasse les critères suivants :

$$h_w / t \leq 200 \qquad \text{... (5.17a)}$$

$$r / t \leq 6 \qquad \text{... (5.17b)}$$

$$45° \leq \phi \leq 90° \qquad \text{... (5.17c)}$$

où :

h_w est la hauteur d'âme entre les axes des semelles ;

r est le rayon intérieur des arrondis ;

ϕ	est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles [degrés].

(1) **I**	ϕ est l'angle aigu entre les lignes moyennes de l'âme et des semelles.

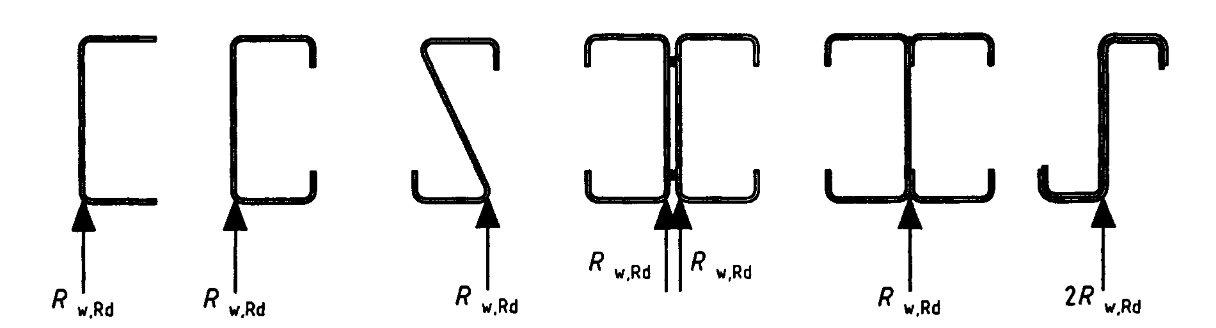


Figure 5.8 : Exemples de sections transversales ne comportant qu'une seule âme

(2) Pour les sections transversales qui satisfont les critères mentionnés en (1), la résistance transversale locale d'une âme $R_{w,Rd}$ peut être déterminée de la façon suivante :

a) pour une seule charge localisée ou réaction d'appui, voir figure 5.9(a) :

i) appliquée à une distance $c \leq 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre :

- pour une section transversale avec semelles raidies :

$$R_{w,Rd} = k_1\ k_2\ k_3\ [9{,}04 - (h_w/t)/60]\ [1 + 0{,}01\ (s_s\ /t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18a)}$$

- pour une section transversale avec semelles non raidies :

- si $s_s/t \leq 60$:

$$R_{w,Rd} = k_1\ k_2\ k_3\ [5{,}92 - (h_w/t)/132]\ [1 + 0{,}01\ (s_s\ /t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18b)}$$

- si $s_s/t > 60$:

$$R_{w,Rd} = k_1\ k_2\ k_3\ [5{,}92 - (h_w/t)/132]\ [0{,}71 + 0{,}015\ (s_s/t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18c)}$$

ii) appliquée à une distance $c > 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre :

- si $s_s/t \leq 60$:

$$R_{w,Rd} = k_3\ k_4\ k_5\ [14{,}7 - (h_w/t)/49{,}5]\ [1 + 0{,}007\ (s_s/t)]t^2\ f_{yb}\ /\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18d)}$$

- si $s_s/t > 60$:

$$R_{w,Rd} = k_3\ k_4\ k_5\ [14{,}7 - (h_w\ /t)/49{,}5]\ [0{,}75 + 0{,}011\ (s_s/t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18e)}$$

b) pour deux charges transversales localisées opposées espacées de moins de $1{,}5 h_w$, voir figure 5.9(b) :

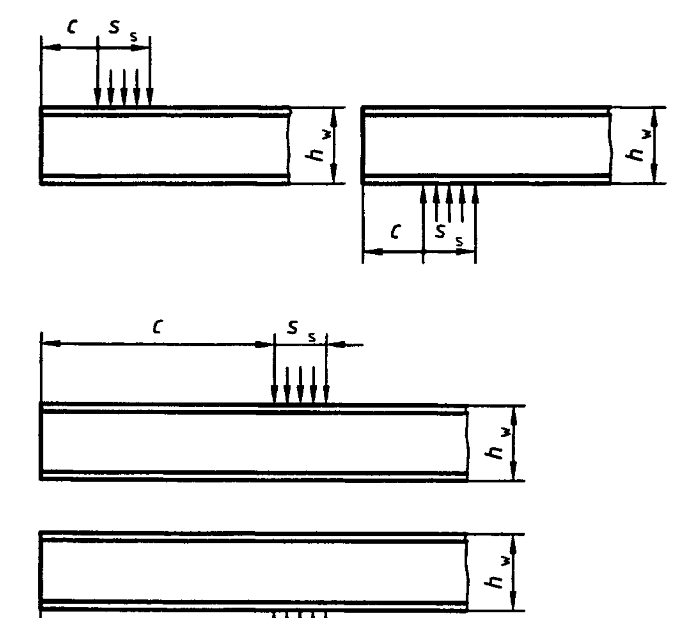
i) la première étant appliquée à une distance $c \leq 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre :

$$R_{w,Rd} = k_1\ k_2\ k_3\ [6{,}66 - (h_w/t)/64]\ [1 + 0{,}01\ (s_s/t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18f)}$$

ii) la première étant appliquée à une distance $c > 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre :

$$R_{w,Rd} = k_3\ k_4\ k_5\ [21{,}0 - (h_w/t)/16{,}3]\ [1 + 0{,}0013\ (s_s/t)]t^2\ f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (5.18g)}$$

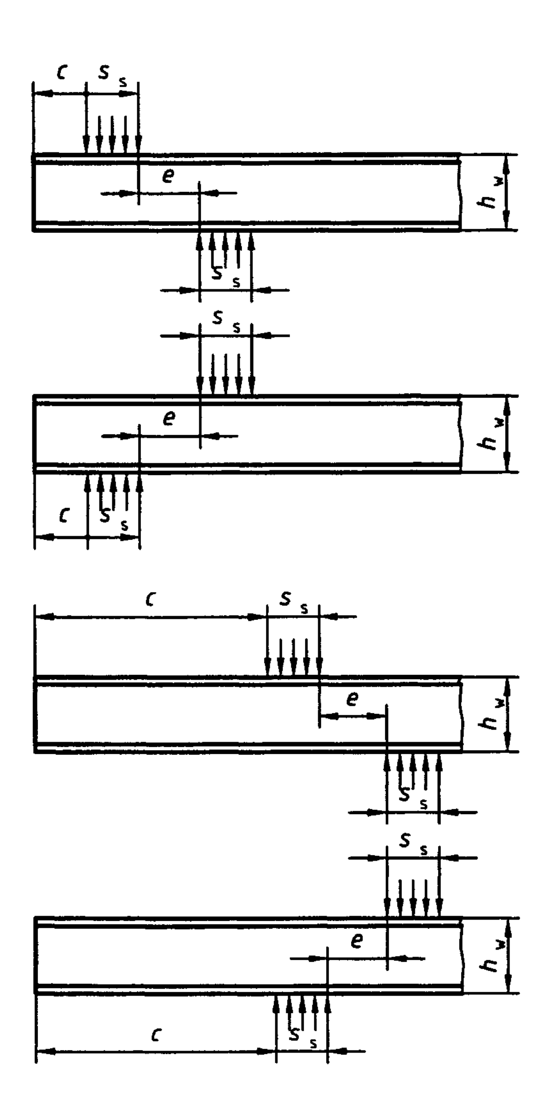
(i) $c \leq 1{,}5\ h_w$



(ii) $c > 1{,}5\ h_w$

(a) Une seule charge localisée ou réaction d'appui

(i) $c \leq 1{,}5\ h_w$



(ii) $c > 1{,}5\ h_w$

(b) Forces opposées avec $e < 1{,}5\ h_w$

Figure 5.9 : Charges localisées et appuis - Sections transversales avec une seule âme

(3) Il convient de déterminer comme suit les valeurs des constantes k_1 à k_5 :

$k_1 = (1,33 - 0,33\ k)$

$k_2 = (1,15 - 0,15\ r/t)$ mais $k_2 \geq 0,50$ et $k_2 \leq 1,0$

$k_3 = 0,7 + 0,3\ (\phi/90)^2$

$k_4 = (1,22 - 0,22\ k)$

$k_5 = (1,06 - 0,06\ r/t)$ mais $k_5 \leq 1,0$

où :

$k = f_{yb} / 228$ [avec f_{yb} en N/mm²] ;

s_s est la longueur réelle d'appui rigide. Dans le cas de deux charges transversales localisées opposées réparties sur des longueurs d'appui inégales, il convient d'utiliser la plus petite valeur de s_s.

5.9.3 Sections transversales comportant deux âmes non raidies ou plus

(1) Dans les sections transversales comportant deux âmes ou plus, y compris les plaques, voir figure 5.10, il convient de déterminer la résistance transversale locale d'une âme non raidie comme spécifié en (2), sous réserve que les deux conditions suivantes soient satisfaites :

- la distance c entre la zone d'application effective de la réaction d'appui ou la charge localisée et une extrémité libre, voir figure 5.11, est d'au moins 40 mm ;
- la section transversale satisfait les critères suivants :

$r/t \leq 10$ ... (5.19a)

$h_w/t \leq 200 \sin \phi$ ... (5.19b)

$45° \leq \phi \leq 90°$ ... (5.19c)

où :

h_w est la hauteur d'âme entre les axes des semelles ;

r est le rayon intérieur des arrondis ;

ϕ	**est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles [degrés].**

(1) **I**	ϕ est l'angle aigu entre les lignes moyennes de l'âme et des semelles.

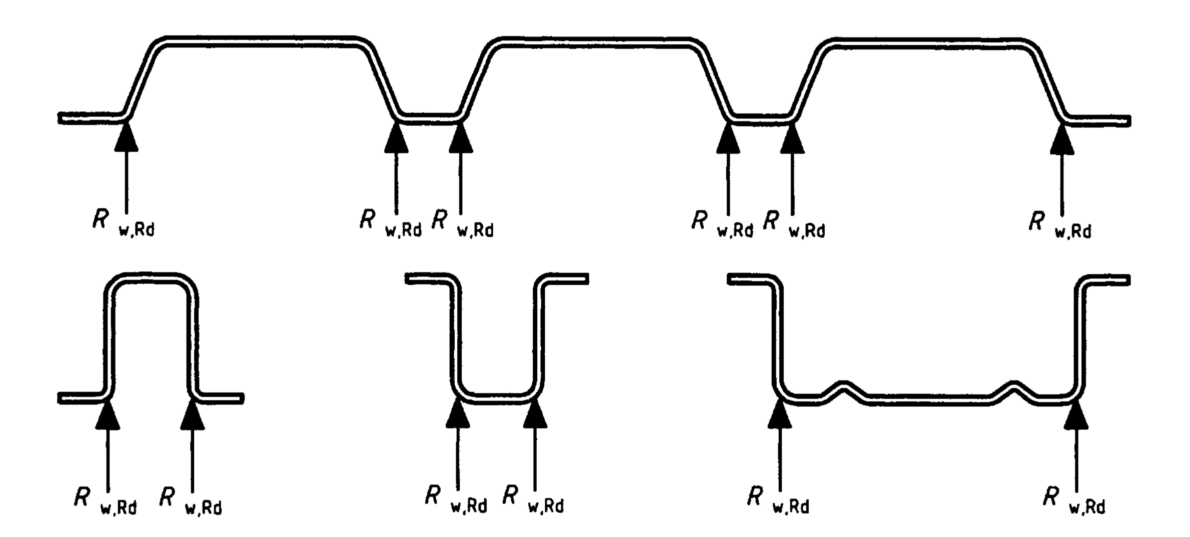


Figure 5.10 : Exemples de sections transversales comportant deux âmes ou plus

(2) Lorsque les deux conditions mentionnées en (1) sont satisfaites, la résistance transversale locale $R_{w,Rd}$ pour chaque âme de la section transversale peut être déterminée de la façon suivante :

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E}\left(1-0{,}1\sqrt{r/t}\right)\left[0{,}5+\sqrt{0{,}02\ell_a/t}\right](2{,}4+(\phi/90)^2)/\gamma_{M1} \quad \ldots (5.20)$$

où :

ℓ_a est la longueur d'appui efficace pour la catégorie appropriée, voir (3) ;

α est le coefficient pour la catégorie appropriée, voir (3).

(3) Il convient de déterminer les valeurs de l_a et de α d'après (4) et (5) respectivement. Il convient de baser la catégorie appropriée (1 ou 2) sur la distance " libre " e entre la charge localisée et l'appui le plus proche, ou la distance " libre " c entre la réaction d'appui ou la charge localisée et une extrémité libre, voir figure 5.11, comme suit :

a) Catégorie 1, voir figure 5.11(a) :

- charge localisée appliquée à une distance $e \leq 1{,}5\ h_w$ de l'appui le plus proche ;
- charge localisée appliquée à une distance $c \leq 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre ;
- réaction au droit de l'appui de rive situé à une distance $c \leq 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre.

b) Catégorie 2, voir figure 5.11(b) :

- charge localisée appliquée à une distance $e > 1{,}5\ h_w$ de l'appui le plus proche ;
- charge localisée appliquée à une distance $c > 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre ;
- réaction au droit de l'appui de rive situé à une distance $c > 1{,}5\ h_w$ d'une extrémité libre ;
- réaction au droit de l'appui intermédiaire.

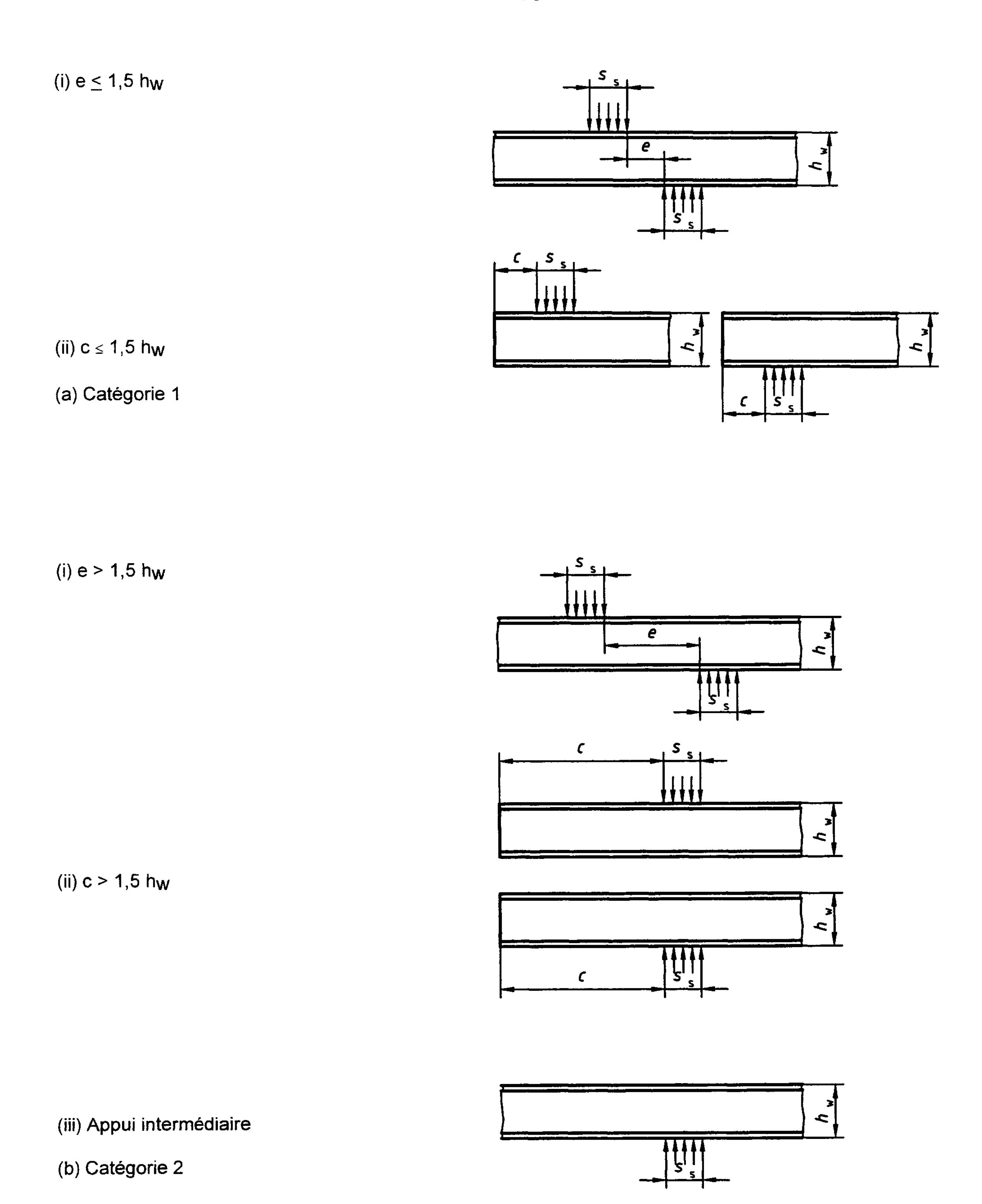


Figure 5.11 : Charges localisées et appuis - Sections transversales avec deux âmes ou plus

(4) Il convient de déterminer la valeur de la longueur d'appui efficace ℓ_a de la façon suivante :

a) Pour la catégorie 1 : ℓ_a = 10 mm ...(5.21a)

b) Pour la catégorie 2 :

- $\beta_V \leq 0,2$: $\ell_a = s_s$ ...(5.21b)

- $\beta_V \geq 0,3$: ℓ_a = 10 mm ...(5.21c)

- $0,2 < \beta_V < 0,3$: procéder à une interpolation linéaire entre les valeurs de ℓ_a pour 0,2 et 0,3.

avec :

$$\beta_V = \frac{|V_{Sd,1}| - |V_{Sd,2}|}{|V_{Sd,1}| + |V_{Sd,2}|}$$

où $|V_{Sd,1}|$ et $|V_{Sd,2}|$ représentent les valeurs absolues des efforts tranchants de part et d'autre de la charge localisée ou de la réaction d'appui, et $|V_{Sd,1}| \geq |V_{Sd,2}|$.

Et s_s est la longueur réelle d'appui rigide

(5) Il convient de déterminer les valeurs du coefficient α de la façon suivante :

a) Pour la catégorie 1 :

- Pour les plaques : $\alpha = 0,075$ ...(5.22a)

- Pour les plateaux et les profils en Ω : $\alpha = 0,057$ ...(5.22b)

b) Pour la catégorie 2 :

- Pour les plaques : $\alpha = 0,15$ ...(5.22c)

- Pour les plateaux et les profils en Ω : $\alpha = 0,115$ ...(5.22d)

5.9.4 Ames raidies

(1) La résistance transversale locale d'une âme raidie peut être déterminée comme spécifié en (2) pour les sections transversales comportant des raidisseurs d'âme longitudinaux pliés de telle façon que les deux plis de l'âme se trouvent de part et d'autre de la ligne d'épure de l'âme joignant les points d'intersection de l'axe de l'âme et des axes des semelles, voir figure 5.12, si ces sections transversales satisfont la condition suivante :

$2 < e_{max} / t < 12$ ... (5.23)

où :

e_{max} est la plus grande excentricité des plis par rapport à la ligne d'épure de l'âme.

(2) Pour les sections transversales comportant des âmes raidies satisfaisant les conditions énoncées en (1), la résistance transversale locale d'une âme raidie peut être déterminée en multipliant la valeur correspondante pour une âme non raidie similaire, obtenue d'après 5.9.2 ou 5.9.3 selon le cas, par le coefficient $\kappa_{a,s}$ donné par :

$\kappa_{a,s} = 1,45 - 0,05 e_{max} / t$ mais $\kappa_{a,s} \leq 0,95 + 35\,000\, t^2\, e_{min} / (b_d^2\, s_p)$ ... (5.24)

où :

b_d est la largeur développée de la semelle chargée, voir figure 5.12 ;

e_{min} est la plus petite excentricité des plis par rapport à la ligne d'épure de l'âme ;

s_p est la largeur de la paroi de l'âme la plus proche de la semelle chargée, voir figure 5.12.

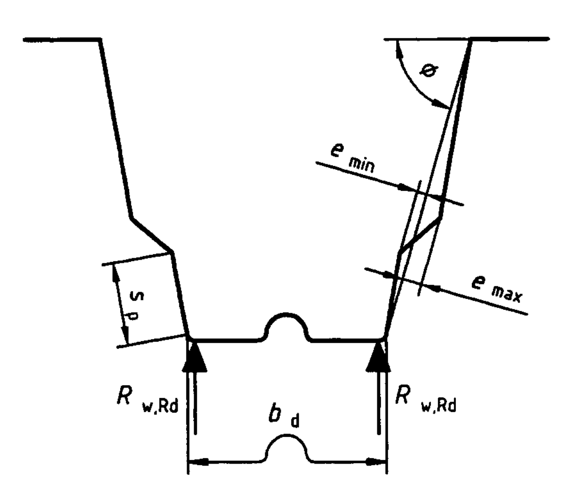


Figure 5.12 : Ames raidies

5.10 Effort tranchant et moment fléchissant combinés

(1)P Les sections transversales soumises à l'action combinée d'un moment fléchissant M_{Sd} et d'un effort tranchant V_{Sd} doivent satisfaire la condition suivante :

$$\left[\frac{M_{Sd}}{M_{c,Rd}}\right]^2 + \left[\frac{V_{Sd}}{V_{w,Rd}}\right]^2 \leq 1 \qquad \text{... (5.25)}$$

où :

$M_{c,Rd}$ est le moment résistant de la section transversale donné en 5.4.1(1)P ;

$V_{w,Rd}$ est la résistance de l'âme à l'effort tranchant donnée en 5.8(1)P.

1(P) **A**	Pour la vérification des sections transversales soumises à l'action combinée d'un effort normal N_{Sd}, d'un moment fléchissant M_{Sd}, d'un effort tranchant V_{Sd}, il y a lieu de vérifier $\left[\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{c,Rd}}\right]^2 + \left[\frac{V_{Sd}}{V_{w,Rd}}\right]^2 \leq 1$, à défaut d'un calcul précis.

5.11 Moment fléchissant et charge localisée ou réaction d'appui combinés

(1)P Les sections transversales soumises à l'action combinée d'un moment fléchissant M_{Sd} et d'une force transversale résultant d'une charge localisée ou d'une réaction d'appui F_{Sd} doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$M_{Sd} / M_{c,Rd} \leq 1 \qquad \text{... (5.26a)}$$

$$F_{Sd} / R_{w,Rd} \leq 1 \qquad \text{... (5.26b)}$$

$$\frac{M_{Sd}}{M_{c,Rd}}+\frac{F_{Sd}}{R_{w,Rd}} \leq 1{,}25 \qquad \text{... (5.26c)}$$

où :

$M_{c,Rd}$ est le moment résistant de la section transversale donné en 5.4.1(1)P ;

$R_{w,Rd}$ est la valeur appropriée de la résistance transversale locale de l'âme obtenue d'après 5.9.

6 Résistance au flambement

C	Les sections 4, 5 et 6 s'inscrivent dans la perspective d'une justification par calculs.

6.1 Généralités

(1)P Les valeurs de calcul des moments et forces internes dans chaque barre ne doivent pas être supérieures à sa résistance au flambement en ce qui concerne :

- la compression axiale, comme indiqué en 6.2 ;
- les moments fléchissants, comme indiqué en 6.3 ;
- la combinaison de flexion et de compression axiale, comme indiqué en 6.5.

(2)P Dans les barres dont les sections transversales sont déformables dans leur plan, on doit tenir compte d'un flambement latéral possible des semelles comprimées et en général d'une flexion latérale des semelles, voir 6.4.

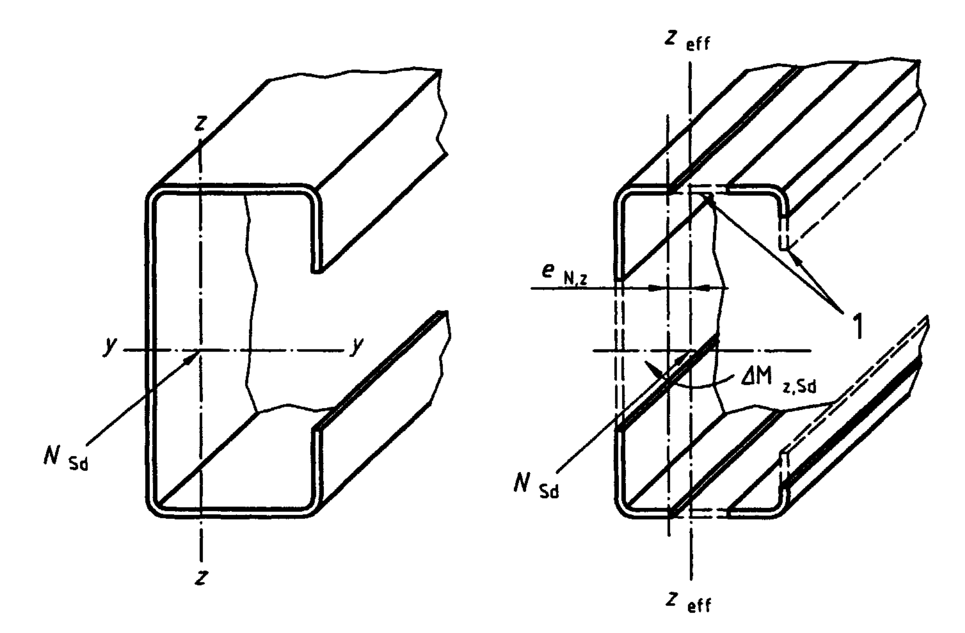
(3)P Les effets du voilement local doivent être pris en compte par l'utilisation de caractéristiques de section efficace déterminées comme indiqué à la section 4.

(4)P L'effort normal dans une barre doit être considéré comme agissant au niveau du centre de gravité de sa section transversale brute.

(5) Il convient de considérer l'effort normal résistant d'une barre à la compression axiale comme agissant au niveau du centre de gravité de sa section transversale efficace. Si ce dernier ne coïncide pas avec le centre de gravité de sa section transversale brute, il convient de prendre en compte les moments correspondant au déplacement des axes centroïdes (voir figure 6.1) à l'aide de la méthode donnée en 6.5.

(6)P L'instabilité globale de l'ossature doit être prise en compte comme indiqué dans l'ENV 1993-1-1.

(6) P C	On vise ici l'application de l'article 5.2 de l'ENV 1993-1-1.



Légende

1 Zones non efficaces

Figure 6.1 : Déplacement des axes centroïdes

6.2 Compression axiale

C	si $\bar{\lambda}$ < 0.2 : la vérification n'est pas à faire

6.2.1 Résistance de calcul au flambement

(1)P Sauf dans le cas où elle est déterminée par une analyse au second ordre de la barre, voir 6.2.2(6)P, la résistance de calcul au flambement pour la compression axiale $N_{b,Rd}$ doit être obtenue par :

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff}\ f_y/\gamma_{M1} \qquad \cong \chi \beta_A\, A_g\ f_y/\gamma_{M1} \qquad \text{... (6.1)}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale, obtenue d'après la section 4 en prenant pour hypothèse une contrainte de compression uniforme $\sigma_{com,Ed}$ égale à f_{yb}/γ_{M1} ;

A_g est l'aire de la section transversale brute ;

χ est la valeur appropriée du coefficient de réduction pour la résistance au flambement ;

et où le coefficient de réduction β_A est donné par :

$$\beta_A = A_{eff}/A_g$$

(2)P Le coefficient de réduction χ pour la résistance au flambement doit être déterminé par :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0,5}} \qquad \text{mais } \chi \leq 1,0 \qquad \text{... (6.2a)}$$

avec :

$$\phi = 0,5\,[1 + \alpha\,(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \qquad \text{... (6.2b)}$$

où :

α est le facteur d'imperfection, en fonction de la courbe de flambement appropriée ;

$\bar{\lambda}$ est l'élancement relatif pour le mode de flambement concerné.

(3)P On doit utiliser la valeur la plus faible de χ pour le flambement par flexion selon tout axe approprié, ou pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion.

(4)P Le facteur d'imperfection α correspondant à la courbe de flambement appropriée doit être obtenu d'après le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Facteur d'imperfection α

Courbe de flambement	a_0	a	b	c
α	0,13	0,21	0,34	0,49

(4)P C	La courbe de flambement a_0 est utilisée pour la vérification introduite par le 4.3.1 (7).

6.2.2 Flambement par flexion

(1)P La résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement par flexion doit être obtenue d'après 6.2.1 au moyen de la courbe de flambement appropriée prise dans le tableau 6.2 en fonction du type de section transversale et de l'axe de flambement.

Tableau 6.2 : Courbe de flambement appropriée pour divers types de section transversale

Type de section transversale		Flambement selon l'axe	Courbe de flambement
	si f_{yb} est utilisée	quelconque	b
	si f_{ya} est utilisée *)	quelconque	c
		y - y	a
		z - z	b
		quelconque	b
ou autre section transversale		quelconque	c

*) Il convient de n'utiliser la limite d'élasticité moyenne f_{ya} que si $A_{eff} = A_g$.

(2)P La courbe de flambement pour une section transversale ne figurant pas dans le tableau 6.2 peut être obtenue par analogie.

(3)P La résistance au flambement d'une section transversale fermée reconstituée doit être déterminée par l'un des moyens suivants :

- courbe de flambement b associée à la limite d'élasticité de base f_{yb} du matériau de la tôle ayant servi à fabriquer le profilé par formage à froid ;
- courbe de flambement c associée à la limite d'élasticité moyenne f_{ya} du profilé après formage à froid, déterminée comme indiqué en 3.1.2, à condition que β_A = 1,0.

(4)P L'élancement relatif $\bar{\lambda}$ pour le flambement par flexion selon un axe donné ($\bar{\lambda}_y$ ou $\bar{\lambda}_z$) doit être déterminé de la façon suivante :

$$\bar{\lambda} = (\lambda / \lambda_1) [\beta_A]^{0,5} \quad \text{... (6.3a)}$$

avec :

$$\lambda = \ell / i \quad \text{... (6.3b)}$$

$$_1 = \pi [E / f_y]^{0,5} \quad \text{... (6.3c)}$$

où :

ℓ est la longueur de flambement pour le flambement par flexion selon l'axe approprié (ℓ_y ou ℓ_z) ;

i est le rayon de giration (i_y ou i_z) selon l'axe correspondant, basé sur les caractéristiques de la section transversale brute.

(5) Il convient de se reporter à l'ENV 1993-1-1 pour les informations concernant la détermination de la longueur de flambement ℓ pour le flambement par flexion d'une barre comprimée à partir de sa longueur d'épure L.

(6)P Comme alternative à (1)P, la résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement par flexion peut être obtenue à partir d'une analyse au second ordre de la barre comme indiqué dans l'ENV 1993-1-1, en se basant sur les caractéristiques de la section transversale efficace obtenue d'après la section 4.

6.2.3 Flambement par torsion et flambement par flexion-torsion.

(1)P Pour les profilés comportant des sections transversales ouvertes présentant un centre de symétrie, on doit tenir compte de la possibilité que la résistance de la barre au flambement par torsion soit inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

(2)P Pour les profilés comportant des sections transversales ouvertes avec un axe de symétrie, voir figure 6.2, on doit tenir compte de la possibilité que la résistance de la barre au flambement par flexion-torsion soit inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

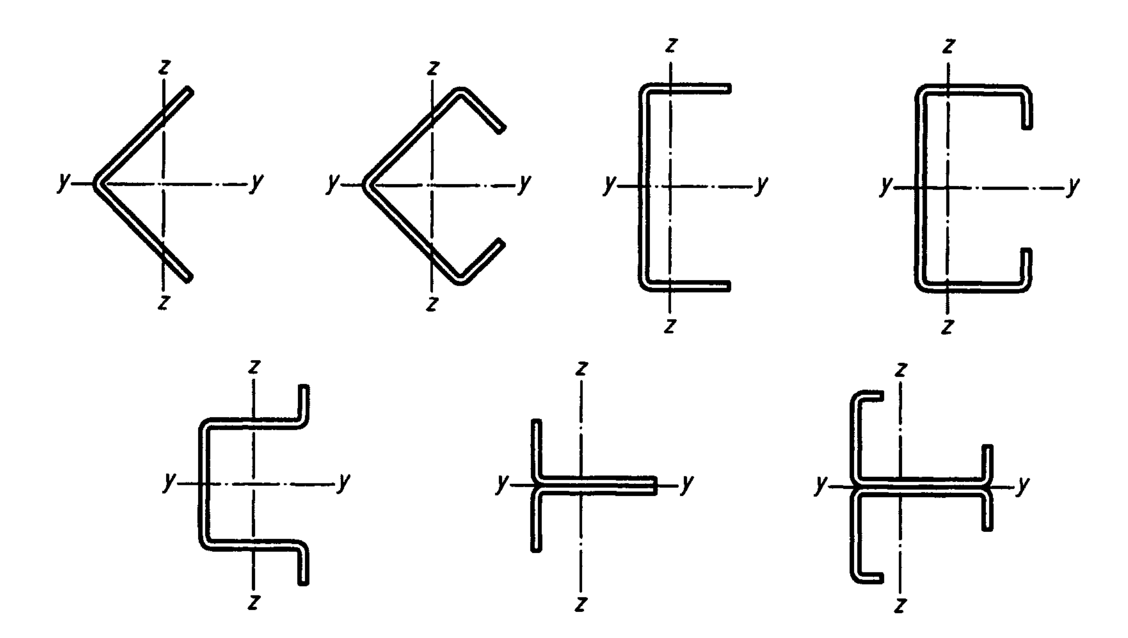


Figure 6.2 : Sections transversales sujettes au flambement par flexion-torsion

(3)P Pour les profilés comportant des sections transversales ouvertes sans symétrie, on doit tenir compte de la possibilité que la résistance de la barre au flambement par torsion ou par flexion-torsion soit inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

(4)P La résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion doit être obtenue d'après 6.2.1 au moyen de la courbe de flambement b.

(5)P L'élancement relatif $\bar{\lambda}$ pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion doit être obtenu par :

$$\bar{\lambda} = [\beta_A]^{0,5} (f_{yb} / \sigma_{cr})^{0,5} \qquad \text{... (6.4a)}$$

avec :

$$\sigma_{cr} = \sigma_{cr,TF} \quad \text{mais} \quad \sigma_{cr} \leq \sigma_{cr,T} \qquad \text{... (6.4b)}$$

où :

$\sigma_{cr,T}$ est la contrainte critique élastique pour le flambement par torsion, voir (6)P ;

$\sigma_{cr,TF}$ est la contrainte critique élastique pour le flambement par flexion-torsion, voir (7)P.

(6)P La contrainte critique élastique $\sigma_{cr,T}$ pour le flambement par torsion doit être déterminée par :

$$\sigma_{cr,T} = \frac{1}{A_g i_o^2} \left[GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{\ell_T^2} \right] \qquad \text{... (6.5a)}$$

avec :

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 \qquad \text{... (6.5b)}$$

où :

G est le module de cisaillement ;

I_t est le moment d'inertie de torsion de la section transversale brute ;

I_W est le moment d'inertie de gauchissement de la section transversale brute ;

i_y est le rayon de giration de la section transversale brute selon l'axe y - y ;

i_z est le rayon de giration de la section transversale brute selon l'axe z - z ;

ℓ_T est la longueur de flambement de la barre pour le flambement par torsion ;

y_0 est la distance entre le centre de torsion et le centre de gravité de la section transversale brute.

(7)P Pour les sections transversales qui sont symétriques par rapport à l'axe y - y, la contrainte critique élastique $\sigma_{cr,TF}$ pour le flambement par flexion-torsion doit être déterminée par :

$$\sigma_{cr,TF} = \frac{1}{2\beta}\left[\left(\sigma_{cr,y}+\sigma_{cr,T}\right)-\sqrt{\left(\sigma_{cr,y}+\sigma_{cr,T}\right)^2-4\beta\,\sigma_{cr,y}\,\sigma_{cr,T}}\right] \quad \text{... (6.6)}$$

avec :

$\sigma_{cr,y} = \pi^2 \; E \; I \; / \; (\ell_y \; / \; i_y \;)^2$

$\beta = 1 - (y_0 \; / \; i_0 \;)^2$

où :

ℓ_y est la longueur de flambement pour le flambement par flexion selon l'axe y - y.

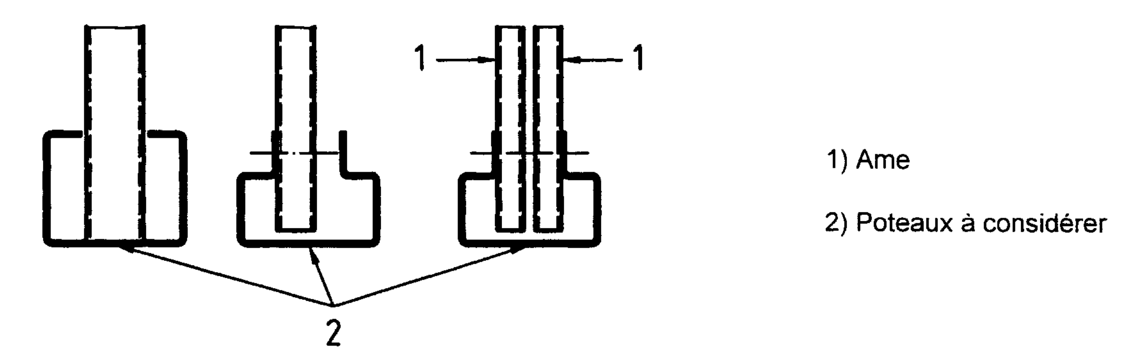
(8)P La longueur de flambement ℓ_T pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion doit être déterminée en tenant compte du degré de maintien à la torsion et au gauchissement à chaque extrémité de la longueur d'épure L_T.

(9) Il convient de ne pas considérer les dispositions pratiques usuelles d'assemblages comme assurant un maintien total à la torsion et au gauchissement, et, par conséquent, il convient normalement de ne pas utiliser les valeurs théoriques de ℓ_T/L_T (1,0 pour "torsion bloquée, gauchissement libre" ou 0,5 pour "torsion bloquée, gauchissement bloqué") directement dans le calcul.

(10) Pour des dispositions pratiques usuelles d'assemblages à chaque extrémité, la valeur de ℓ_T/L_T peut être prise égale aux valeurs suivantes :

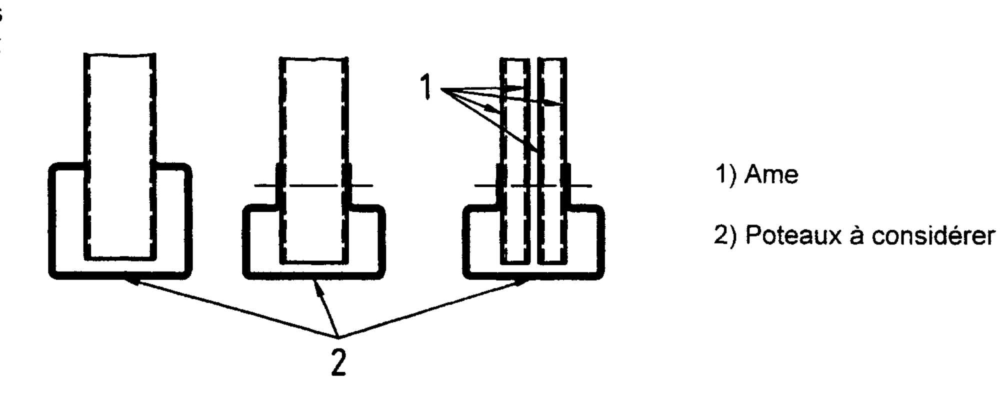
- 1,0 pour les assemblages assurant un maintien partiel à la torsion et au gauchissement, voir figure 6.3(a) ;

- 0,7 pour les assemblages assurant un maintien significatif à la torsion et au gauchissement, voir figure 6.3(b).



a) Assemblages capables d'assurer un maintien partiel à la torsion et au gauchissement

Profils creux ou profils avec des boulons traversant deux âmes par profilé.



b) Assemblages capables d'assurer un maintien significatif à la torsion et au gauchissement

Figure 6.3 : Maintien à la torsion et au gauchissement par des assemblages couramment réalisables

(11) Des valeurs améliorées de ℓ_T/L_T peuvent être utilisées lorsque cela est justifié par des essais conformes aux dispositions de la section 9.

6.3 Déversement de barres fléchies

(1)P La valeur de calcul du moment résistant à l'instabilité d'une barre sujette au déversement doit être déterminée par :

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff} f_{yb}/\gamma_{M1} \quad \text{... (6.7)}$$

où χ_{LT} est obtenu de la façon suivante :

- si $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$:

$$\chi_{LT} = 1,0 \quad \text{... (6.8a)}$$

C	et il n'y a pas à faire de vérification au déversement

- si $\bar{\lambda}_{LT} > 0,4$:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left[\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2\right]^{0,5}}$$ ... (6.8b)

avec :

$$\phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$ ... (6.9a)

$$\bar{\lambda}_{LT} = [f_y W_{eff} / M_{cr}]^{0,5}$$ ... (6.9b)

$\alpha_{LT} = 0,21$ [courbe de flambement a du tableau 6.1]

où :

M_{cr} est le moment critique élastique de la section transversale brute, pour le déversement selon l'axe approprié ;

W_{eff} est le module de résistance de la section transversale brute, si celle-ci n'est soumise qu'à un moment selon l'axe approprié.

NOTE : Des informations concernant le calcul de M_{cr} sont données dans l'annexe F de l'ENV 1993-1-1.

(2) Il convient de ne pas utiliser cette méthode pour les profilés en U et profilés similaires qui présentent un angle significatif entre les axes principaux de la section transversale efficace, par rapport à ceux de la section transversale brute.

I (1) et (2) On peut appliquer l'annexe F de l'ENV 1993-1-1 pour les sections du domaine d'application de cette annexe.

Pour les autres sections, à défaut de justifications plus précises, on peut appliquer la procédure suivante :

- calcul de M_{cr} suivant l'annexe F de l'ENV 1993-1-1 ;

- calcul de l'effort normal critique de flambement latéral pour une partie de section isolée composée de la semelle comprimée et d'un sixième de la hauteur de l'âme ;

- prise en considération de la solution la plus défavorable.

6.4 Instabilité de forme transversale

(1)P L'instabilité de forme transversale doit être prise en compte lorsqu'elle constitue le mode de ruine critique.

(2) Il convient de prendre en compte les effets d'instabilité de forme transversale dans les cas tels que ceux illustrés par les figures 6.4(a), (b) et (c), si la plus petite contrainte critique élastique pour un mode d'instabilité de forme, évaluée par l'étude des différents modes de déformation possibles, est inférieure aux contraintes critiques élastiques pour le voilement local et pour le flambement d'ensemble, comme indiqué sur la figure 6.5.

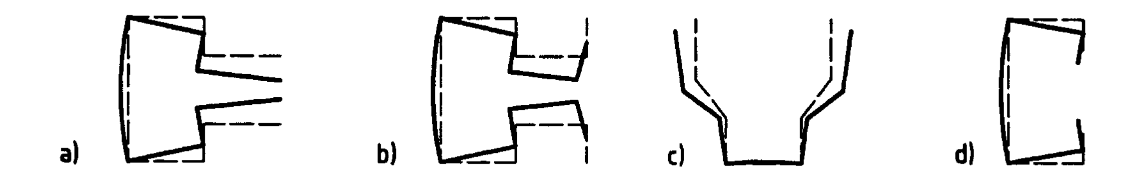


Figure 6.4 : Exemples de modes d'instabilité de forme transversale

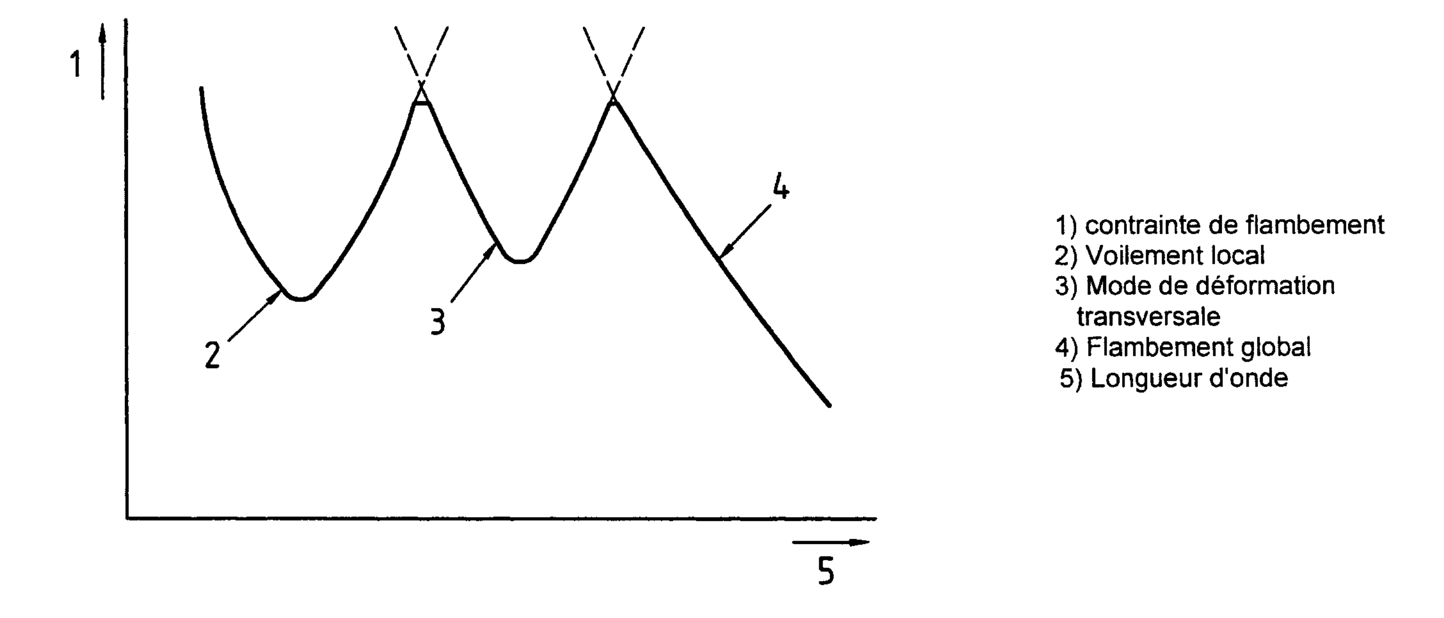


Figure 6.5 : Contraintes critiques élastiques pour divers modes de ruine

(3) Pour les éléments munis de raidisseurs de bord ou intermédiaires, comme indiqué sur la figure 6.4(d), aucune prise en compte supplémentaire de l'instabilité de forme transversale n'est nécessaire si l'aire efficace du raidisseur est réduite comme indiqué en 4.3.

6.5 Flexion et compression axiale

A Comme alternative au 6.5.1, on peut établir la résistance d'une barre soumise à une combinaison de flexion et de compression axiale à partir d'une analyse au second ordre comme indiqué dans l'ENV 1993-1-1, en se basant sur les caractéristiques de la section transversale efficace obtenue d'après la section 4.

6.5.1 Généralités

(1)P Toutes les barres soumises à une combinaison de flexion et de compression axiale doivent satisfaire le critère suivant :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff} / \gamma_{M1}} + \frac{\kappa_y \left(M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}\right)}{f_{yb} W_{eff,y,com} / \gamma_{M1}} + \frac{\kappa_z \left(M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}\right)}{f_{yb} W_{eff,z,com} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad \text{... (6.10)}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace d'une section transversale efficace soumise uniquement à une compression axiale, voir figure 6.6(a) ;

$W_{eff,y,com}$ est le module de résistance efficace pour la contrainte de compression maximale dans une section transversale efficace soumise uniquement à un moment selon l'axe y - y, voir figure 6.6(b) ;

$W_{eff,z,com}$ est le module de résistance efficace pour la contrainte de compression maximale dans une section transversale efficace soumise uniquement à un moment selon l'axe z - z, voir figure 6.6(c) ;

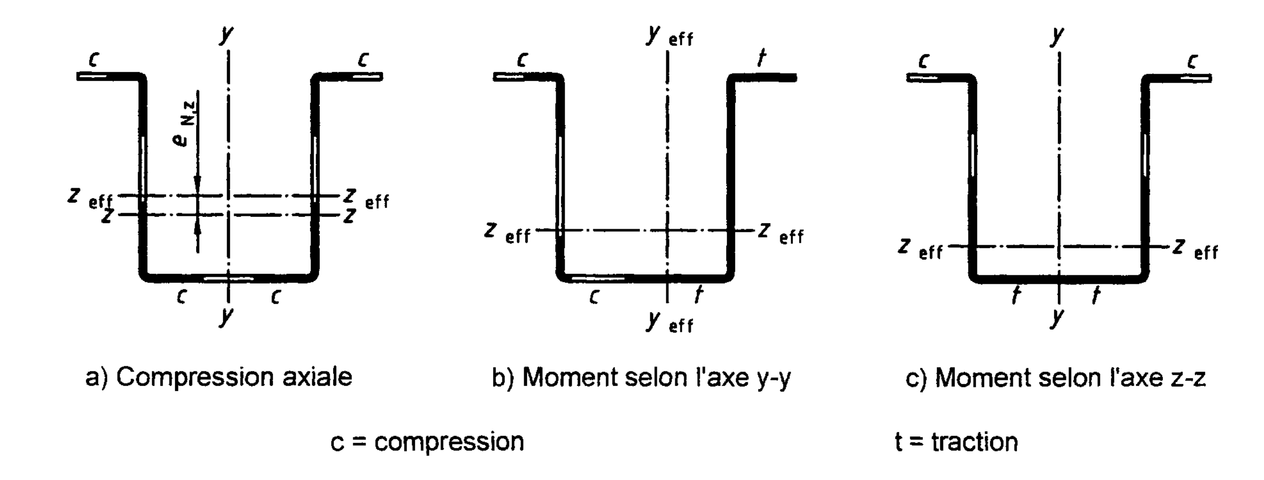
$\Delta M_{y,Sd}$ est le moment additionnel résultant d'un déplacement éventuel de l'axe centroïde dans la direction z, voir 5.6(2)P ;

$\Delta M_{z,Sd}$ est le moment additionnel résultant d'un déplacement éventuel de l'axe centroïde dans la direction y, voir 5.6(2)P ;

χ_y est le coefficient de réduction d'après 6.2 pour le flambement selon l'axe y - y ;

χ_z est le coefficient de réduction d'après 6.2 pour le flambement selon l'axe z - z ;

χ_{min} est la plus petite des deux valeurs χ_y et χ_z.



a) Compression axiale b) Moment selon l'axe y-y c) Moment selon l'axe z-z

c = compression t = traction

Figure 6.6 : Calcul des caractéristiques de section efficace

(2)P Les coefficients κ_y et κ_z dans l'expression (6.10) doivent être obtenus par :

$$\kappa_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Sd}}{\chi_y f_{yb} A_{eff}} \quad \text{mais} \quad \kappa_y \leq 1{,}50 \quad \text{... (6.11a)}$$

$$\kappa_z = 1 - \frac{\mu_z N_{Sd}}{\chi_z f_{yb} A_{eff}} \quad \text{mais} \quad \kappa_z \leq 1{,}50 \qquad \text{... (6.11b)}$$

avec :

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y \left(2\beta_{M.y} - 4\right) \quad \text{mais} \quad \mu_y \leq 0{,}90$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z \left(2\beta_{M.z} - 4\right) \quad \text{mais} \quad \mu_z \leq 0{,}90$$

où :

$\beta_{M,y}$ est le coefficient de moment uniforme équivalent pour le flambement selon l'axe y - y ;

$\beta_{M,z}$ est le coefficient de moment uniforme équivalent pour le flambement selon l'axe z - z.

NOTE Les expressions donnant μ_y et μ_z peuvent aboutir à des valeurs négatives.

(3)P Les coefficients de moment uniforme équivalent $\beta_{M,y}$ et $\beta_{M,z}$ doivent être basés sur la forme du diagramme des moments fléchissants selon l'axe approprié, entre les points qui sont maintenus dans la direction appropriée, comme indiqué dans le tableau 6.3. Les moments fléchissants pris en compte doivent comprendre les moments additionnels $\Delta M_{y,Sd}$ et $\Delta M_{z,Sd}$ résultant d'un déplacement éventuel des axes centroïdes.

Tableau 6.3 : Axes appropriés pour le calcul des coefficients β_M

Coefficient	Diagramme des moments fléchissants appliqués selon l'axe	Flambement latéral selon l'axe	Longueur d'épure prise entre les points maintenus dans la direction
$\beta_{M,y}$	y - y	y - y	z - z
$\beta_{M,z}$	z - z	z - z	y - y
$\beta_{M,LT}$	y - y	z - z	y - y

(4)P Les coefficients de moment uniforme équivalent $\beta_{M,y}$ et $\beta_{M,z}$ doivent être déterminés à partir du tableau 6.4.

Tableau 6.4 : Coefficients de moment uniforme équivalent

Diagramme des moments	Facteur de moment uniforme équivalent β_M
Moments d'extrémités + M_1 − M_1 + M_1 − ψM_1 + M_1 − ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M,\psi} = 1{,}8 - 0{,}7\,\psi$
Moments dus à des charges transversales + − M_Q + − M_Q	$\beta_{M,Q} = 1{,}3$ $\beta_{M,Q} = 1{,}4$
Moments dus à des charges transversales et à des moments d'extrémité ΔM + M_1 − ψM_1 M_Q ΔM + M_1 − ψM_1 M_Q + − M_1 ΔM ψM_1 M_Q ΔM + M_1 − ψM_1 M_Q	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}\left(\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi}\right)$ où : M_Q = | max M | dû seulement aux charges transversales ΔM = | max M | pour un diagramme des moments sans changement de signe ΔM = | max M | + | min M | pour un diagramme des moments avec changement de signe

6.5.2 Flexion et compression axiale avec déversement

(1)P Les barres sujettes au déversement doivent également satisfaire le critère suivant :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{lat} f_{yb} A_{eff} / \gamma_{M1}} + \frac{\kappa_{LT}\left(M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}\right)}{\chi_{LT} f_{yb} W_{eff,y,com} / \gamma_{M1}} + \frac{\kappa_{z}\left(M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}\right)}{f_{yb} W_{eff,z,com} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad \text{... (6.12)}$$

où :

χ_{LT} est le coefficient de réduction pour le déversement, voir 6.3.

(2)P En règle générale, le coefficient réducteur χ_{lat} doit être pris égal à χ_z. Cependant, si le flambement par flexion-torsion (voir 6.2.3) ou l'instabilité de forme transversale (voir 6.4) constituent des modes de ruine potentiels, χ_{lat} doit être pris égal à la plus petite valeur parmi χ_z et les valeurs de χ pour le flambement par flexion-torsion ou par instabilité de forme transversale.

(3)P Le coefficient κ_{LT} de l'expression (6.12) doit être obtenu par :

$$\kappa_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{Sd}}{\chi_z f_{yb} A_{eff}} \quad \text{mais} \quad \kappa_{LT} \leq 1{,}0 \quad \text{... (6.13a)}$$

avec :

$$\mu_{LT} = 0{,}15\,\bar{\lambda}_{lat}\,\beta_{M,LT} - 0{,}15 \quad \text{mais} \quad \mu_{LT} \leq 0{,}90 \quad \text{... (6.13b)}$$

(4)P Le coefficient de moment uniforme équivalent pour le déversement $\beta_{M,LT}$ doit être basé sur la forme du diagramme des moments fléchissants selon l'axe y - y, entre les points qui sont maintenus dans la direction y - y, comme indiqué également dans le tableau 6.3. Les moments fléchissants pris en compte doivent comprendre le moment additionnel $\Delta M_{y,Sd}$ résultant d'un déplacement éventuel de l'axe centroïde.

(5)P Le facteur de moment uniforme équivalent $\beta_{M,LT}$ doit être déterminé à partir du tableau 6.4.

7 Etats limites de service

7.1 Généralités

(1)P Les principes concernant les états limites de service donnés dans la section 4 de l'ENV 1993-1-1 doivent également être appliqués aux profilés et aux plaques à parois minces formés à froid.

(2) Il convient également d'appliquer aux profilés et plaques à parois minces formés à froid, les règles d'application données à la section 4 de l'ENV 1993-1-1, sauf modifications apportées par les règles d'application supplémentaires de la présente section 7.

(3) Il convient d'utiliser les valeurs de calcul pour la combinaison caractéristique (rare) des actions, voir ENV 1991-1, dans les vérifications aux états limites de service pour les calculs de déformation plastique et de flèche.

NOTE Dans l'ENV 1993-1-1, la combinaison caractéristique (rare) est appelée "combinaison rare".

(4) Il convient d'utiliser les caractéristiques de la section efficace pour les états limites de service obtenues d'après la section 4 dans tous les calculs aux états limites de service pour les profilés et les plaques à parois minces formés à froid.

(5) Le moment d'inertie de la section efficace I_{eff} peut être considéré comme variable sur la longueur de la travée. Il est néanmoins possible d'utiliser, à titre d'alternative, une valeur uniforme basée sur le moment maximal en travée résultant de l'application des charges de service.

7.2 Déformation plastique

(1) Afin d'éviter une déformation plastique excessive dans les conditions normales d'exploitation, si l'on utilise une redistribution des moments et des efforts internes dans l'analyse globale aux états limites ultimes, il convient de s'assurer qu'aucune déformation plastique significative n'est susceptible de se produire sous l'application des charges correspondant aux états limites de service.

(2) Dans de tels cas, il convient que la combinaison du moment de flexion sur appui et de la réaction d'appui au droit d'un appui intermédiaire ne soit pas supérieure à 0,9 fois la résistance de calcul combinée, déterminée en utilisant $\gamma_{M,ser}$.

(3) La résistance de calcul combinée peut être déterminée d'après 5.11, en utilisant la section transversale efficace pour les états limites de service ainsi que $\gamma_{M,ser}$. De manière alternative, on peut déterminer la résistance de calcul à partir d'essais conformes aux dispositions de la section 9, en divisant la résistance caractéristique R_k par $\gamma_{M,ser}$.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données dans l'annexe A.

7.3 Flèches

(1) Il convient de limiter les flèches à des valeurs qui évitent d'affecter défavorablement l'aspect ou l'utilisation normale de la structure, et de détériorer des finitions ou des éléments non structurels.

(1) **C**	Il est rappelé que l'article 4.2.3 de l'ENV 1993-1-1 traite de l'accumulation d'eau de pluie pour les toitures à faible pente. A titre indicatif, l'annexe H de la norme NF P 84-206-1 (DTU 43.3) donne un exemple de méthode de vérification des éléments d'ossature sous accumulation d'eau.

(2) Les flèches peuvent être calculées en prenant l'hypothèse d'un comportement élastique.

(2) **C**	Le cas échéant, il convient de prendre en compte les jeux des assemblages (par exemple, cas de l'éclissage).

(3) Il convient que la flèche calculée d'une panne dans la direction perpendiculaire à la surface du toit, résultant des charges variables de gravité, ne soit pas supérieure à $L/180$, où L représente la portée de la panne.

(3) **I**	Il convient que la flèche calculée d'une panne dans la direction perpendiculaire à la surface du toit, résultant des charges de gravité, ne soit pas supérieure à $L/200$, où L représente la portée de la panne.

7.4 Plaques

(1) Il convient d'adopter les dispositions données en 7.2 pour le calcul des plaques.

(2) Il convient également d'adopter les dispositions données en 7.3(1) et (2) pour le calcul des plaques, mais la limite de flèche donnée en 7.3(3) ne s'applique pas aux plaques.

(2) **I**	Il convient également d'adopter les dispositions données en 7.3(1) et (2) pour le calcul des plaques.

8. Assemblages

8.1 Généralités

8.1.1 Hypothèses de calcul

(1)P Les assemblages doivent être calculés sur la base d'une hypothèse réaliste de la répartition des forces et moments internes, en prenant en considération les rigidités relatives existant dans l'assemblage. Cette répartition doit correspondre aux cheminements directs des charges à travers les éléments de l'assemblage. On doit s'assurer que l'équilibre est conservé vis-à-vis des forces et moments externes appliqués.

(2)P On peut tenir compte de la ductilité de l'acier facilitant la redistribution des efforts internes. En conséquence, il n'est pas utile de tenir compte des contraintes résiduelles et des contraintes résultant du serrage des fixations et des tolérances normales dans l'ajustement des pièces.

(3)P La facilité de fabrication et de montage doit être prise en compte dans la conception des détails des assemblages et des joints de continuité. Une attention particulière doit être apportée aux jeux nécessaires au serrage des fixations, aux exigences des modes opératoires de soudage, et aux besoins ultérieurs de contrôle, de traitement de surface et d'entretien.

8.1.2 Intersections

(1)P Les barres se rencontrant au niveau d'un noeud doivent normalement être disposées de sorte que leurs axes centroïdes concourent en un même point.

(2)P En cas d'excentricité au niveau des intersections, les barres et les assemblages doivent être dimensionnés pour reprendre les moments qui en résultent.

(3) Dans le cas d'ossatures boulonnées constituées de cornières et de profils en T, on peut utiliser les lignes de trusquinage des boulons pour l'épure au droit de l'assemblage au lieu des axes centroïdes.

(3) I Clause supprimée.

8.1.3 Assemblages soumis à des chocs, vibrations ou charges alternées

(1)P Lorsqu'un assemblage est soumis à des chocs ou à des vibrations, on doit utiliser des boulons précontraints, ou des boulons munis de dispositifs de blocage ou des soudures.

(2)P Lorsqu'un assemblage sollicité au cisaillement est soumis à des contraintes alternées (sauf si ces contraintes sont dues uniquement au vent) ou lorsque pour quelque raison particulière, le glissement des boulons n'est pas admissible, on doit utiliser des boulons précontraints, des boulons ajustés ou des soudures.

8.2 Exigences concernant les assemblages

8.2.1 Assemblages dans une structure réticulée

(1)P Dans une structure réticulée, les assemblages de profilés doivent être conventionnellement articulés, c'est-à-dire :

- être capables de transmettre les efforts calculés dans l'analyse globale ;

- être capables d'admettre les rotations en résultant ;

- ne pas générer de moments significatifs susceptibles d'affecter défavorablement les profilés de l'ossature.

8.2.2 Assemblages dans une structure continue

(1)P Dans une structure continue, les assemblages de profilés doivent être capables de transmettre les efforts et les moments calculés dans l'analyse globale.

(2) Si l'on utilise une analyse globale élastique, il convient que la rigidité d'un assemblage résistant aux moments ne soit pas inférieure à celle de la barre assemblée.

(3) Dans le cas d'une analyse globale plastique, il convient que le moment résistant d'un assemblage résistant aux moments, qui est situé au droit ou à proximité de l'emplacement d'une rotule plastique, ne soit pas inférieur au moment résistant de la section transversale de la barre assemblée. En outre, il convient que l'assemblage possède une capacité de rotation suffisante.

8.2.3 Assemblages dans une structure semi-continue

(1)P Dans une structure semi-continue, les assemblages de profilés doivent être capables d'offrir un degré prévisible d'interaction. Les assemblages résistant aux moments doivent être capables de résister aux moments internes générés par leur fonctionnement, en plus des autres efforts et moments internes s'exerçant au droit des assemblages.

(2) Il convient que les assemblages résistant aux moments présentent une rigidité suffisante pour correspondre aux moments calculés dans l'analyse globale, mais une flexibilité suffisante pour ne pas générer de moments supérieurs à leur capacité de résistance.

(3) Si la valeur de calcul du moment résistant d'un assemblage est inférieure à celle de la barre assemblée, il convient de démontrer que la capacité de rotation de l'assemblage est suffisante pour permettre la nécessaire redistribution des efforts et moments internes.

8.3 Joints de continuité et assemblages d'extrémité de barres comprimées

(1)P Les joints de continuité et assemblages d'extrémité de barres comprimées doivent présenter au moins la même résistance que la section transversale de la barre, ou être calculés pour résister à un moment fléchissant additionnel résultant des effets de second ordre dans la barre, en plus de l'effort de compression interne N_{Sd} et des moments internes $M_{y,Sd}$ et $M_{z,Sd}$ obtenus par l'analyse globale.

(2) En l'absence d'une analyse au second ordre de la barre, il convient de considérer ce moment additionnel ΔM_{Sd} comme agissant selon l'axe de la section transversale qui donne la plus petite valeur du coefficient de réduction χ pour le flambement par flexion, voir 6.2.1(2)P, avec une valeur déterminée par :

$$\Delta M_{Sd} = N_{Sd}\left[\frac{1}{\chi}-1\right]\frac{W_{eff}}{A_{eff}}\sin\frac{\pi a}{\ell} \qquad \text{... (8.1)}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale ;

a est la distance entre le joint de continuité ou l'assemblage d'extrémité et le point d'inflexion le plus proche ;

ℓ est la longueur de flambement de la barre entre les points d'inflexion, pour le flambement selon l'axe approprié ;

W_{eff} est le module de la section transversale efficace pour la flexion selon l'axe approprié.

(3) Il convient de concevoir les joints de continuité et assemblages d'extrémité de telle sorte que les efforts puissent être transmis aux parties résistantes de la section transversale.

(4) Si les détails de construction aux extrémités d'un profilé sont tels que la ligne d'action de l'effort axial interne ne peut pas être clairement identifiée, il convient de prendre comme hypothèse une excentricité appropriée et de prendre en compte les moments résultants dans le calcul de la barre, des assemblages d'extrémité ainsi que du joint de continuité s'il existe.

8.4 Assemblages comportant des fixations mécaniques

(1)P Les assemblages comportant des fixations mécaniques doivent être de forme compacte. Les emplacements des fixations doivent être disposés de sorte à offrir un espace suffisant pour un assemblage et un entretien satisfaisants.

(2)P Les efforts de cisaillement s'exerçant sur les fixations mécaniques individuelles au sein d'un assemblage peuvent être considérés comme égaux, à condition que :

- les fixations présentent une ductilité suffisante ;

- le cisaillement ne constitue pas le mode de ruine critique.

(3)P Les fixations utilisées doivent posséder des résistances connues et documentées.

(4)P Les résistances des fixations mécaniques individuelles doivent être déterminées soit par calcul, soit à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9. Pour le dimensionnement par calcul, les résistances des fixations mécaniques soumis à des charges statiques doivent être déterminées à partir :

- du tableau 8.1 pour les rivets aveugles ;

- du tableau 8.2 pour les vis autotaraudeuses ;

- du tableau 8.3 pour les clous à scellement;

- du tableau 8.4 pour les boulons.

Tableau 8.1 : Résistances de calcul pour les rivets aveugles [1)]

Rivets sollicités en cisaillement :

Résistance en pression diamétrale :

$F_{b,Rd} = \alpha\, d\, t\, f_u / \gamma_{M2}$

où la valeur de α est donnée par :

- si $t = t_1$: $\alpha = 3{,}2\sqrt{(t/d)}$ mais $\alpha \leq 2{,}1$
- si $t_1 \geq 2{,}5\,t$: $\alpha = 2{,}1$
- si $t < t_1 \leq 2{,}5\,t$: obtenir α par interpolation linéaire.

Résistance de section nette :

$F_{n,Rd} = A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$

Résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Conditions :

$F_{v,Rd} \geq 1{,}2\, F_{b,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\, F_{n,Rd}$

Rivets sollicités en traction : [2)]

Résistance au déboutonnage :

La résistance au déboutonnage $F_{p,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Résistance à l'arrachement :

Sans objet pour les rivets

I La résistance à l'arrachement $F_{o,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Résistance à la traction :

La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Conditions :

$F_{t,Rd} \geq n\, F_{p,Rd}$

Domaine de validité : [3)]

$e_1 \geq 3d$	$p_1 \geq 3d$	$2{,}6 \text{ mm} \leq d \leq 6{,}4 \text{ mm}$
$e_2 \geq 1{,}5d$	$p_2 \geq 3d$	

1) Dans ce tableau, il est supposé que la tôle la moins épaisse est au contact de la tête préformée du rivet aveugle.

2) Habituellement, on n'utilise pas les rivets aveugles en traction.

3) Les rivets aveugles peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si la résistance est déterminée à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9.

Tableau 8.2 : Résistances de calcul pour les vis autotaraudeuses ou autoperceuses [1)]

Vis sollicitées en cisaillement :
Résistance en pression diamétrale : $F_{b,Rd} = \alpha\, d\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ où la valeur de α est donnée par : - si $t = t_1$: $\alpha = 3{,}2 \sqrt{(t/d)}$ mais $\alpha \leq 2{,}1$ - si $t_1 \geq 2{,}5\, t$: $\alpha = 2{,}1$ - si $t < t_1 \leq 2{,}5\, t$: obtenir α par interpolation linéaire. Résistance de section nette : $F_{n,Rd} = A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$ Résistance au cisaillement : La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ est à déterminer par des essais.
Conditions : $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\, F_{b,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\, F_{n,Rd}$
Vis sollicitées en traction :
Résistance au déboutonnage : [2)] - pour les charges statiques : $F_{p,Rd} = d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ - pour les vis soumises à des charges de vent répétées : $F_{pr,Rd} = 0{,}5\, d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ Résistance à l'arrachement : $F_{o,Rd} = 0{,}65\, d\, t_{sup}\, f_{u,sup} / \gamma_{M2}$ Résistance à la traction : La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ est à déterminer par des essais.
Conditions : $F_{t,Rd} \geq n\, F_{p,Rd}$ et $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$
Domaine de validité : [3)]
En règle générale : $e_1 \geq 3d$ $p_1 \geq 3d$ $3{,}0\ \text{mm} \leq d \leq 8{,}0\ \text{mm}$ $e_2 \geq 1{,}5d$ $p_2 \geq 3d$ Pour la traction : $0{,}5\ \text{mm} \leq t \leq 1{,}5\ \text{mm}$ et $t_1 \geq 0{,}9\ \text{mm}$
1) Dans ce tableau, il est supposé que la tôle la moins épaisse est au contact de la tête de la vis. 2) Ces valeurs supposent que la rondelle possède une rigidité suffisante qui l'empêche d'être déformée de façon significative ou de passer au-dessus de la tête de la fixation. 3) Les vis autotaraudeuses peuvent être utilisées au-delà de ce domaine de validité si la résistance est déterminée à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9.

Tableau 8.3 : Résistances de calcul pour les clous à scellement

Clous à scellement sollicités en cisaillement :

Résistance en pression diamétrale :

$F_{b,Rd} = 3{,}2\, d\, t\, f_u / \gamma_{M2}$

Résistance de section nette :

$F_{n,Rd} = A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$

Résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Conditions :

$F_{v,Rd} \geq 1{,}5\, F_{b,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1{,}5\, F_{n,Rd}$

Clous à scellement sollicités en traction :

Résistance au déboutonnage : [1)]

- pour les charges statiques : $F_{p,Rd} = d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$
- pour les charges de vent répétées : $F_{pr,Rd} = 0{,}5\, d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$

Résistance à l'arrachement :

La résistance à l'arrachement $F_{o,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Résistance à la traction :

La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Conditions :

$F_{o,Rd} \geq n\, F_{p,Rd}$

$F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$

Domaine de validité : [2)]

En règle générale :	$e_1 \geq 4{,}5\, d$	$3{,}7 \text{ mm} \leq d \leq 6{,}0 \text{ mm}$	
	$e_2 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 3{,}7$ mm :	$t_{sup} \geq 4{,}0$ mm
	$p_1 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 4{,}5$ mm :	$t_{sup} \geq 6{,}0$ mm
	$p_2 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 5{,}2$ mm :	$t_{sup} \geq 8{,}0$ mm
Pour la traction :	$0{,}5 \text{ mm} \leq t \leq 1{,}5 \text{ mm}$		$t_{sup} \geq 6{,}0$ mm

1) Ces valeurs supposent que la rondelle possède une rigidité suffisante qui l'empêche d'être déformée de façon significative ou de passer au-dessus de la tête de la fixation.

2) Les clous à scellement peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si la résistance est déterminée à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9.

Tableau 8.4 : Résistances de calcul pour les boulons

Boulons sollicités en cisaillement :

Résistance en pression diamétrale :

$F_{b,Rd} = 2,5\, d\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ mais $F_{b,Rd} \leq (e_1\, t / 1,2)\, (f_u / \gamma_{M2})$

Résistance de section nette :

$F_{n,Rd} = (1 + 3\, r\, (d_o / u - 0,3))\, A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$ mais $F_{n,Rd} \leq A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$

avec :

r = [nombre de boulons au droit de la section transversale]/[nombre total de boulons dans l'assemblage]

$u = 2\, e_2$ mais $u \leq p_2$

Résistance au cisaillement :

- pour les classes de résistance 4.6, 5.6 et 8.8 :

$$F_{v,Rd} = 0,6\, f_{ub}\, A_s / \gamma_M$$

- pour les classes de résistance 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 :

$$F_{v,Rd} = 0,5\, f_{ub}\, A_s / \gamma_{M2}$$

Conditions :

$F_{v,Rd} \geq 1,2\, F_{b,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1,2\, F_{n,Rd}$

Boulons sollicités en traction :

Résistance au déboutonnage :

La résistance au déboutonnage $F_{p,Rd}$ est à déterminer par des essais.

Résistance à l'arrachement :

Sans objet pour les boulons.

Résistance à la traction :

$F_{t,Rd} = 0,9\, f_{ub}\, A_s / \gamma_{M2}$

Conditions :

$F_{t,Rd} \geq n\, F_{p,Rd}$

Domaine de validité : [1)]

$e_1 \geq 1,5\, d$	$p_1 \geq 3d$	$t \geq 1,25$mm	Taille minimale de boulon : M 6
$e_2 \geq 1,5\, d$	$p_2 \geq 3d$		Classes de résistance : 4.6 - 10.9

1) Les boulons peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si la résistance est déterminée à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9.

(5)P Dans les tableaux 8.1 à 8.4, la signification des symboles est la suivante :

A est l'aire de la section transversale brute d'un boulon ;

A_s est l'aire de la section résistante en traction d'un boulon ;

A_{net} est l'aire de section transversale nette de la partie assemblée ;

d est le diamètre nominal de la fixation ;

d_0 est le diamètre nominal du trou ;

d_w est le diamètre de la rondelle ou de la tête de la fixation ;

e_1 est la pince longitudinale, distance mesurée entre le centre de la fixation et le bord adjacent de la partie assemblée, dans la direction de la transmission de l'effort, voir figure 8.1 ;

e_2 est la pince transversale, distance mesurée entre le centre de la fixation et le bord adjacent de la partie assemblée, dans la direction perpendiculaire à celle de la transmission de l'effort, voir figure 8.1 ;

f_{ub} est la résistance à la rupture en traction du matériau du boulon ;

$f_{u,sup}$ est la résistance à la traction de l'élément support dans lequel une vis est fixée ;

n est le nombre de tôles fixées sur l'élément support par la même vis ou le même clou à scellement ;

p_1 est l'entr'axe des fixations dans la direction de la transmission de l'effort, voir figure 8.1 ;

p_2 est l'entr'axe des fixations dans la direction perpendiculaire à celle de la transmission de l'effort, voir figure 8.1 ;

t est l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée la plus mince ;

t_1 est l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée la plus épaisse ;

t_{sup} est l'épaisseur de l'élément support dans lequel une vis ou un clou à scellement est fixé.

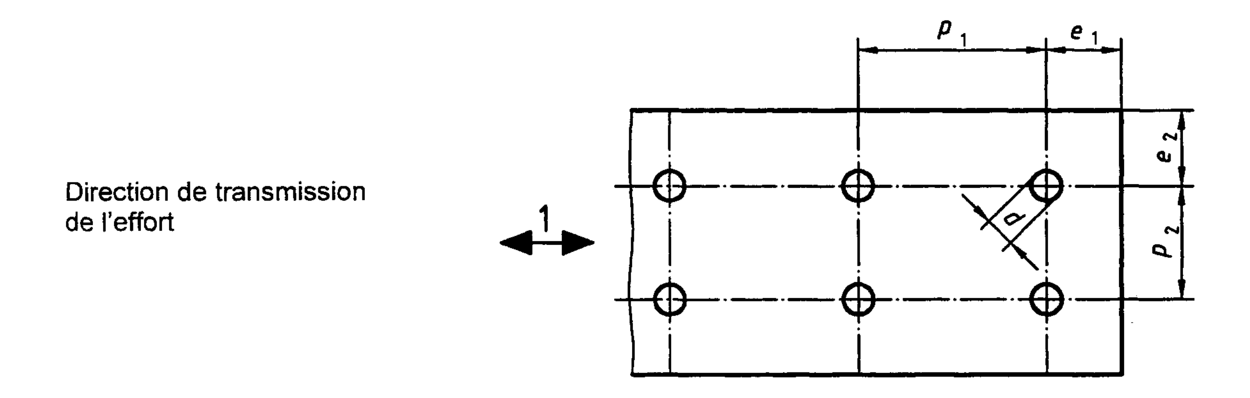


Figure 8.1 : Pince longitudinale, pince transversale et espacement des fixations et des soudures par points

(6)P Le coefficient partiel γ_{M2} pour déterminer les résistances de calcul des fixations mécaniques doit être pris égal à :

$$\gamma_{M2} = \boxed{1,25}$$

(6) **A**	γ_{M2} doit être égal à 1,5 dans le cas des boulons sollicités en traction.

(7)P La résistance d'un assemblage doit, de préférence, être basée sur des essais conformes aux dispositions de la section 9. Comme alternative, la résistance d'un assemblage soumis à des charges statiques peut être déterminée à partir des tableaux 8.1 à 8.4, à condition que les limites concernant les dimensions des fixations et les épaisseurs de tôles mentionnées dans les tableaux soient respectées.

(8) Si la résistance à l'arrachement $F_{o,Rd}$ d'une fixation est inférieure à sa résistance au déboutonnage $F_{p,Rd}$, il convient de déterminer la capacité de déformation à partir de résultats d'essais conformes aux dispositions de la section 9.

(9) Il convient de réduire les résistances au déboutonnage données dans les tableaux 8.2 et 8.3 pour les vis autotaraudeuses et les clous à scellement si les fixations ne sont pas situées dans l'axe médian des nervures des tôles. Pour une fixation par nervure implantée avec une excentricité du quart de la largeur de plage, il convient de réduire la résistance de calcul à 0,9 $F_{p,Rd}$ et pour deux fixations par nervure implantées avec la même excentricité, il convient de prendre la résistance égale à 0,7 $F_{p,Rd}$ par fixation, voir figure 8.2.

(10) Pour une fixation sollicitée à la fois en cisaillement et en traction, si la résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ ou la résistance à la traction $F_{t,Rd}$ ont été déterminées par des essais, il convient également de vérifier la résistance à la combinaison de cisaillement et de traction sur la base d'essais conformes aux dispositions de la section 9. A condition que $F_{v,Rd}$ et $F_{t,Rd}$ soient toutes deux déterminées par calcul sur la base des tableaux 8.1 à 8.4, la résistance de la fixation à la combinaison de cisaillement et de traction peut être vérifiée par :

$$F_{t,Sd} / F_{t,Rd} + F_{v,Rd} / F_{t,Rd} \leq 1 \qquad ..... (8.2)$$

(10) I Pour une fixation autre qu'un boulon, sollicitée à la fois en cisaillement et en traction, il convient de vérifier la résistance à la combinaison de cisaillement et de traction sur la base d'essais, conformes aux dispositions de la section 9.

Pour les boulons sollicités à la fois en cisaillement et en traction, il convient de vérifier, en plus des critères de résistance sous sollicitations simples, la condition :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1$$

où $F_{v,Rd}$ et $F_{t,Rd}$ sont les résistances de calcul au cisaillement et à la traction définies au tableau 8.4.

(11) L'état limite de distorsion globale peut être considéré comme satisfait si la résistance de calcul est obtenue à partir des tableaux 8.1 à 8.4, à condition que la fixation traverse une plage dont la largeur ne soit pas supérieure à 150 mm.

(12) Il convient que le diamètre des avant-trous destinés aux vis soit conforme aux directives du fabricant. Il convient que ces directives soient basées sur les critères suivants :

- que le couple appliqué soit juste supérieur au couple de taraudage ;
- que le couple appliqué soit inférieur au couple d'arrachement du filetage ou au couple de rupture par cisaillement de la tête ;
- que le couple de taraudage soit inférieur à 2/3 du couple de rupture par cisaillement de la tête.

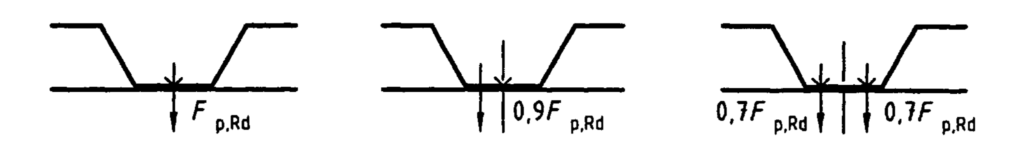


Figure 8.2 : Réduction de la résistance à la traction en fonction de la position des fixations

C	Il est rappelé (voir 8.4 (6)) que le coefficient partiel γ_{M2} est pris égal à 1,25 sauf dans le cas des boulons sollicités en traction pour lesquels γ_{M2} est pris égal à 1,5.

8.5 Soudures par points

(1)P Les soudures par points peuvent être utilisées avec une tôle brute de laminage ou galvanisée d'une épaisseur allant jusqu'à 4,0 mm, à condition que l'épaisseur de la partie assemblée la plus mince ne soit pas supérieure à 3,0 mm.

(2) Les soudures par points peuvent être des soudures par résistance ou des soudures par fusion.

(3)P La résistance de calcul $F_{v,Rd}$ d'une soudure par points sollicitée en cisaillement doit être déterminée à l'aide du tableau 8.5 .

(4)P Dans le tableau 8.5, la signification des symboles est la suivante :

A_{net} est l'aire de la section transversale nette de la partie assemblée ;

t est l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée la plus mince [mm] ;

t_1 est l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée la plus épaisse ;

(c) d_s	est le diamètre à l'interface d'une soudure par points défini en 8.4(6)P

et les pinces longitudinale et transversale e_1 et e_2 ainsi que les espacements p_1 et p_2 sont tels que définis en 8.4(5)P.

Tableau 8.5 : Résistances de calcul pour les soudures par points

Soudures par points sollicitées en cisaillement :	
Résistance à la déchirure et en pression diamétrale : - si $t \leq t_1 \leq 2{,}5\, t$: $F_{tb,Rd} = 2{,}7\sqrt{t}\; d_s\, f_u / \gamma_{M2}$ [unités : N et mm] - si $t_1 > 2{,}5\, t$: $F_{tb,Rd} = 2{,}7\sqrt{t}\; d_s\, f_u / \gamma_{M2}$ mais $F_{tb,Rd} \leq 0{,}7 d_s^2\, f_u / \gamma_{M2}$ et $F_{tb,Rd} \leq 3{,}1\, t\, d_s\, f_u / \gamma_{M2}$ Résistance d'extrémité : $F_{e,Rd} = 1{,}4\, t\, e_1\, f_u / \gamma_{M2}$ Résistance de section nette : $F_{n,Rd} = A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$ Résistance au cisaillement : $F_{v,Rd} = (\pi/4)\, d_s^2\, f_u / \gamma_{M2}$	
Conditions : $F_{v,Rd} \geq 1{,}25\, F_{tb,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1{,}25\, F_{e,Rd}$ et $F_{v,Rd} \geq 1{,}25\, F_{n,Rd}$	
Domaine de validité :	
$2d_s \leq e_1 \leq 6\, d_s$	$3d_s \leq p_1 \leq 8\, d_s$
$e_2 \leq 4\, d_s$	$3d_s \leq p_2 \leq 6\, d_s$

(5)P Le coefficient partiel γ_M pour la détermination des résistances de calcul des soudures par points doit être pris égal à :

$$\gamma_{M2} = \boxed{1{,}25}$$

(6)P Le diamètre à l'interface d_s d'une soudure par points doit être déterminé de la façon suivante :

- pour le soudage par fusion : $d_s = 0{,}5\, t + 5$ mm ... (8.3a)

- pour le soudage par résistance : $d_s = 5\sqrt{t}$ [avec t en mm] ... (8.3b)

(7)P La valeur de d_s réellement obtenue par le mode opératoire de soudage doit être vérifiée par des essais de cisaillement conformes aux dispositions de la section 9, en utilisant des éprouvettes d'essai à simple recouvrement telles qu'illustrées par la figure 8.3.

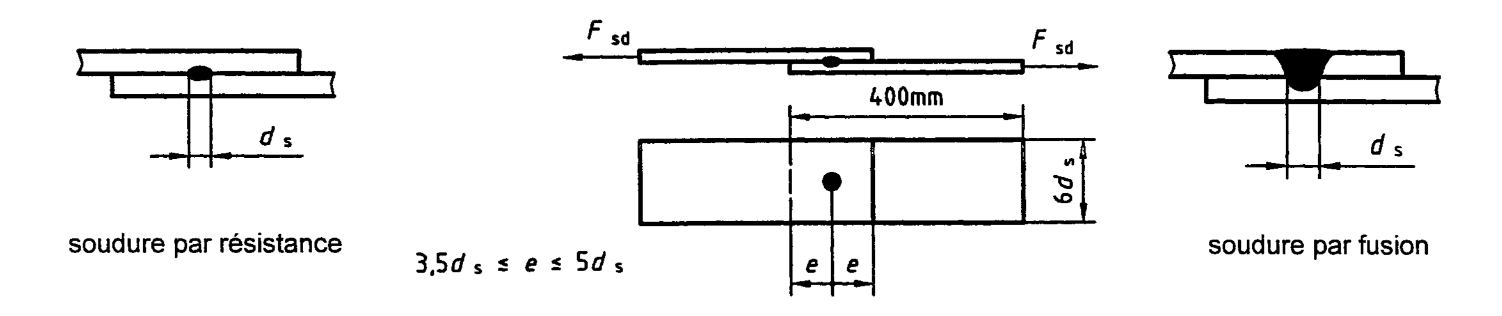


Figure 8.3 : Eprouvettes pour essais de cisaillement de soudures par points

8.6 Assemblages à clin par soudure

8.6.1 Généralités

(1)P Le présent article 8.6 doit être utilisé pour le calcul des assemblages à clin par soudure exécutés à l'arc sur une épaisseur de métal de base inférieure ou égale à 4,0 mm. Pour une épaisseur plus forte de métal de base, les assemblages à clin par soudure doivent être calculés selon l'ENV 1993-1-1.

(2)P La taille de la soudure doit être choisie de telle sorte que la résistance de l'assemblage soit gouvernée par l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée et non par la soudure.

(3) L'exigence énoncée en (2)P peut être considérée comme satisfaite si la dimension de gorge de la soudure est au moins égale à l'épaisseur de la partie ou de la tôle assemblée.

(3) C	La condition fixée ne peut en général être satisfaite que si le procédé de soudage employé permet une pénétration suffisante du cordon. Il convient que cela soit vérifié conformément à 6.6.5.2(3) et (4) de l'ENV 1993-1-1.

(4)P Le coefficient partiel γ_M pour la détermination des résistances de calcul des assemblages à clin par soudure doit être pris égal à :

$$\gamma_{M2} = \boxed{1,25}$$

8.6.2 Soudures d'angle

(1)P La résistance de calcul $F_{w,Rd}$ d'un assemblage par soudure d'angle doit être déterminée de la façon suivante :

- pour un cordon latéral faisant partie d'un ensemble de deux soudures d'angle latérales :

$$F_{w,Rd} = t\, L_{w,s}\, (0,9 - 0,45\, L_{w,s}/b)\, f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.4a)}$$

I

$$F_{w,Rd} = t\, L_{w,s}\, (0,9 - 0,45\, L_{w,s} / b)\, f_u / \gamma_{M2} \quad \text{si} \quad L_{w,s} \leq b$$

$$F_{w,Rd} = 0,45\, t\, b\, f_u / \gamma_{M2} \quad \text{si} \quad L_{w,s} > b \qquad \text{... (8.4a)}$$

- pour un cordon frontal d'extrémité :

$$F_{w,Rd} = t\, L_{w,e}\, (1 - 0,3\, L_{w,e} / b)\, f_u / \gamma_{M2} \quad \text{[pour une seule soudure]} \qquad \text{... (8.4b)}$$

où :

b est la largeur de la partie ou de la tôle assemblée, voir figure 8.4 ;

$L_{w,e}$ est la longueur efficace de la soudure d'angle frontale d'extrémité, voir figure 8.4 ;

$L_{w,s}$ est la longueur efficace d'une soudure d'angle latérale, voir figure 8.4.

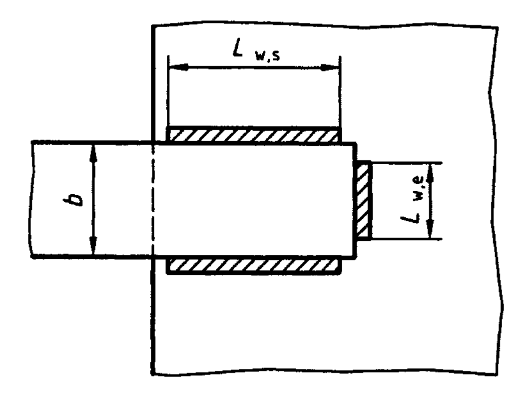


Figure 8.4 : Assemblage par soudure d'angle à clin

(2)P Si l'on utilise une combinaison de soudures d'angle frontales d'extrémité et de soudures d'angle latérales dans un même assemblage, sa résistance totale doit être prise égale à la somme des résistances des soudures d'angle frontales d'extrémité et des soudures d'angle latérales.

(3)P La longueur efficace L_w d'une soudure d'angle doit être prise égale à la longueur hors-tout du cordon entier, y compris les retours d'extrémité. A condition que la soudure présente une pleine section sur toute sa longueur, aucune réduction de la longueur efficace n'est nécessaire pour le départ ou l'arrêt du cordon.

(4) Pour transmettre tous efforts, il convient de ne pas concevoir les soudures d'angle d'une longueur efficace inférieure à 8 fois l'épaisseur de la partie assemblée la plus mince.

8.6.3 Soudures par points à l'arc

(1)P Les soudures par points à l'arc ne doivent pas être conçues pour transmettre des efforts autrement qu'en cisaillement.

(2)P Les soudures par points à l'arc ne doivent pas être utilisées pour des assemblages de parties ou de tôles dont l'épaisseur totale Σt est supérieure à 4 mm, ou lorsque la partie ou la tôle assemblée la plus mince à une épaisseur supérieure à 4 mm.

(2) C	Les deux cas évoqués sont illustrés respectivement par les figures 8.6 b) et 8.6 a).

(3)P Les soudures par points à l'arc doivent avoir un diamètre à l'interface effectif d_s d'au moins 10 mm.

(4)P Si la partie ou la tôle assemblée a une épaisseur inférieure à 0,7 mm, une rondelle pour soudure doit être utilisée, voir figure 8.5.

1) Partie ou tôle assemblée
2) Rondelle pour soudure
3) Elément support

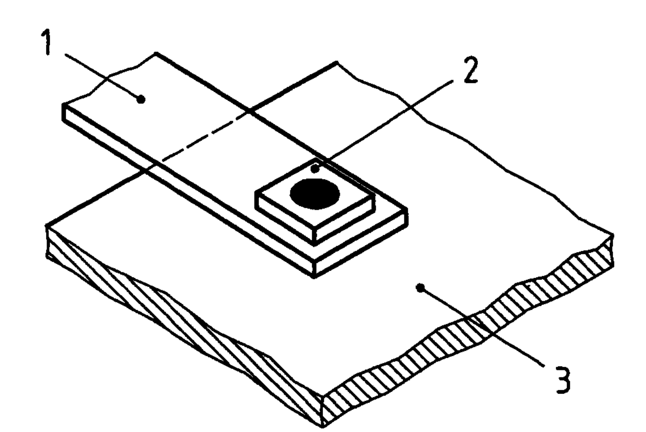


Figure 8.5 : Soudure par points à l'arc avec rondelle pour soudure

(5)P Les soudures par points à l'arc doivent présenter des pinces longitudinale et latérale appropriées.

(5)P **A**	Il y a lieu de respecter le domaine de validité indiqué dans le tableau 8.5.

(6) Il convient de déterminer la résistance de calcul au cisaillement $F_{w,Rd}$ d'une soudure circulaire par points à l'arc de la façon suivante :

$$F_{w,Rd} = (\pi/4)\, d_s^2 \times 0{,}5\, f_{uw} / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.5a)}$$

où :

f_{uw} est la résistance à la traction du métal des électrodes de soudage ;

mais il convient de prendre $F_{w,Rd}$ au plus égale à la résistance périphérique donnée par les expressions suivantes :

C	avec dp défini en (8) et $\varepsilon = [235/fy]^{0,5}$

- si $d_p / \Sigma t \leq 24\, \varepsilon$:

$$F_{w,Rd} = 1{,}33\, d_p\, \Sigma t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.5b)}$$

- si $24\, \varepsilon < d_p / \Sigma t < 41{,}5\, \varepsilon$:

$$F_{w,Rd} = 0{,}17\, (d_p + 164\varepsilon\, \Sigma t)\, \Sigma t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.5c)}$$

- si $d_p / \Sigma t \geq 41{,}5\, \varepsilon$:

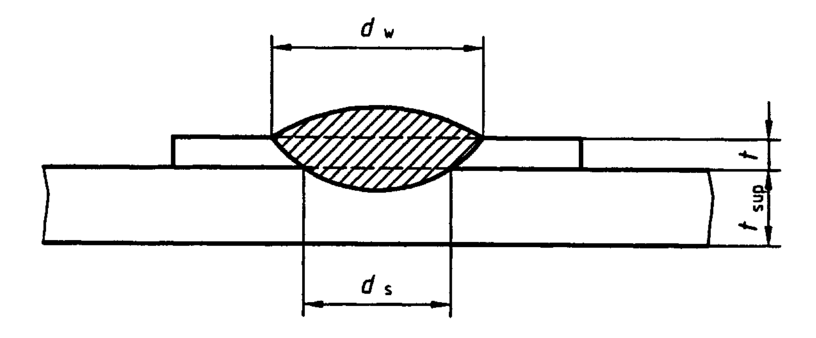
$$F_{w,Rd} = 0{,}84\, d_p\, \Sigma\, t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.5d)}$$

(7) Il convient de déterminer le diamètre à l'interface d_s d'une soudure par points à l'arc, voir figure 8.6, par :

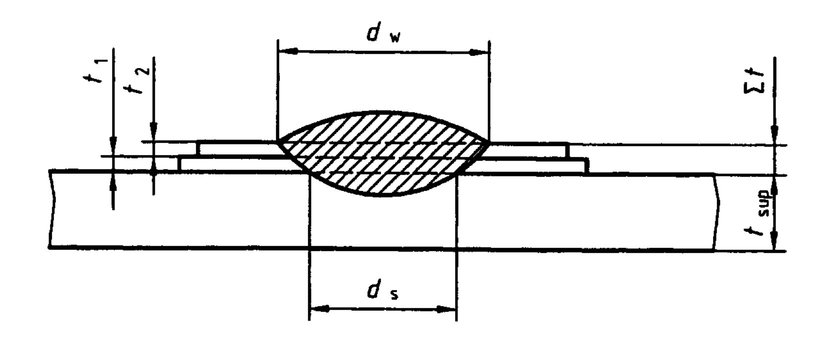
$$d_s = 0{,}7\, d_w - 1{,}5 \sum t \quad \dots (8.6)$$

où :

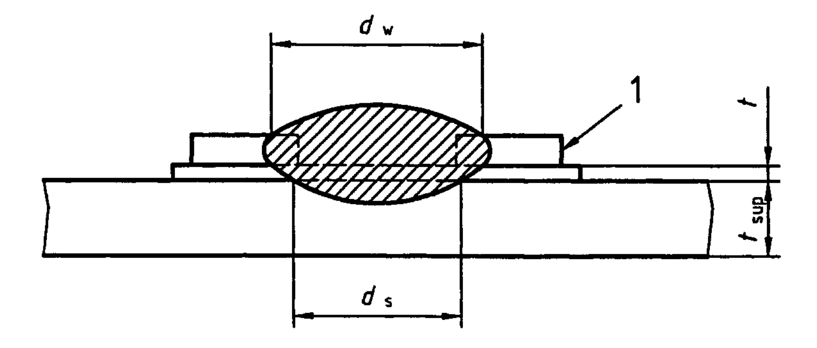
d_w est le diamètre visible de la soudure par points à l'arc, voir figure 8.6.



a) Une seule tôle assemblée ($\Sigma t = t$)



b) Deux tôles assemblées ($\Sigma t = t_1 + t_2$)



1) rondelle pour soudure

c) Une seule tôle assemblée avec rondelle pour soudure

Figure 8.6 : Soudure par points à l'arc

(8) Il convient de déterminer le diamètre périphérique efficace d_p d'une soudure par points à l'arc de la façon suivante :

- pour une seule partie ou une seule tôle assemblée d'épaisseur t :

$$d_p = d_w - t \qquad \text{... (8.7a)}$$

- pour plusieurs parties ou tôles assemblées d'une épaisseur totale Σt :

$$d_p = d_w - 2\,\Sigma t \qquad \text{... (8.7b)}$$

(9) Il convient de déterminer la résistance de calcul au cisaillement Fw,Rd d'une soudure oblongue par points à l'arc par :

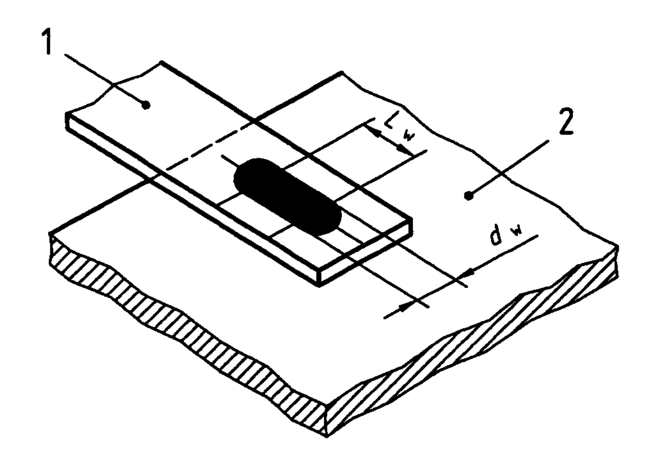
$$F_{w,Rd} = [(\pi/4)\, d_s^2 + L_w\, d_s\,] \times 0{,}5\, f_{uw} / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.8a)}$$

mais il convient de prendre $F_{w,Rd}$ au plus égale à la résistance périphérique donnée par :

$$F_{w,Rd} = (0{,}4L_w + 1{,}33d_p\,)\, \Sigma t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{... (8.8b)}$$

où :

L_w est la longueur de la soudure oblongue par points à l'arc, mesurée comme indiqué sur la figure 8.7.



1) Partie ou tôle assemblée

2) Elément support

Figure 8.7 : Soudure oblongue par points à l'arc

9 Dimensionnement assisté par des essais

9.1 Bases

(1)P La présente section 9 doit être utilisée pour l'application des principes de dimensionnement assisté par des essais donnés dans la section 8 de l'ENV 1993-1-1 aux cas particuliers des profilés et plaques à parois minces formés à froid.

(2) Les essais peuvent être réalisés dans l'une quelconque des circonstances suivantes :

a) si les caractéristiques de l'acier sont inconnues ;

b) si l'on désire tenir compte des caractéristiques réelles du profilé ou de la plaque formé à froid ;

c) si l'on ne dispose pas de méthodes d'analyse appropriées pour le dimensionnement d'un composant par calcul seul ;

d) si l'on ne peut obtenir de données réalistes pour le calcul par un autre moyen ;

e) si l'on désire vérifier le comportement d'une structure ou d'un composant de structure existant ;

f) si l'on désire construire un certain nombre de structures ou de composants similaires sur la base d'un prototype ;

g) si la confirmation de la conformité d'une production est exigée ;

h) si l'on désire déterminer les effets d'une interaction avec d'autres composants de structure ;

i) si l'on désire déterminer les effets de maintien latéral ou en torsion procuré par d'autres composants ;

j) si l'on désire démontrer la validité et l'adéquation d'une méthode d'analyse ;

k) si l'on désire produire des tableaux de charges basés sur des essais, ou sur une combinaison d'essais et d'analyse ;

l) si l'on désire tenir compte de facteurs pratiques susceptibles de modifier le comportement d'une structure, mais qui ne sont pas pris en compte par la méthode d'analyse adaptée pour le dimensionnement par calcul.

(3) Il convient que les essais réalisés pour servir de base à des tableaux de charges soient conformes aux dispositions du 9.3.

NOTE Des informations sont données dans l'annexe A sur les méthodes concernant :

- les essais sur plaques et plateaux ;
- les essais sur profilés formés à froid ;
- les essais sur structures et parties de structures ;
- les essais sur poutres maintenues en torsion par des plaques ;
- l'évaluation des résultats d'essais en vue de la détermination de valeurs de calcul.

(4) Il convient de réaliser les essais de traction de l'acier conformément à l'EN 10002-1. Il convient de réaliser les essais d'autres caractéristiques de l'acier conformément aux normes européennes appropriées.

(5) Il convient de réaliser les essais de fixations et d'assemblages conformément à la norme européenne, ou à la norme internationale appropriée s'il en existe une.

Note : Dans l'attente de la disponibilité d'une norme européenne ou internationale appropriée, on peut trouver des directives sur les méthodes d'essai concernant les fixations dans les ouvrages suivants :

NOTE I : Dans l'attente de la disponibilité d'une norme européenne ou internationale appropriée, il convient d'appliquer les normes XP P 30-010, XP P 30-312, XP P 30-313 et XP P 30-314.

On peut également trouver des informations complémentaires sur les méthodes d'essais concernant les fixations dans les ouvrages suivants :

Publication CECM N°21 (1983) : Recommandations européennes pour la construction en acier : dimensionnement et essais d'assemblages de plaques et de profilés en acier;

Publication CECM N°42 (1983) : Recommandations européennes pour la construction en acier : fixations mécaniques pour l'utilisation avec des plaques et profilés en acier.

9.2 Conditions

(1)P L'organisation, l'exécution, l'évaluation et la documentation des essais doivent être conformes aux prescriptions minimales spécifiées dans la présente section 9.

(2)P La réalisation d'évaluations expérimentales ne doit être confiée qu'à des entités dont le personnel est suffisamment formé et expérimenté dans les domaines de l'organisation, de l'exécution et de l'évaluation des essais.

(3)P Le laboratoire d'essais doit posséder l'équipement approprié, et l'entité chargée des essais doit garantir une gestion et une documentation soignées de tous les essais.

(4)P L'utilisation de tout résultat d'essai doit être cohérente avec les conditions particulières de l'essai.

(5)P Les essais doivent simuler le comportement du profilé, des plaques ou de l'assemblage dans les conditions réelles, et les conditions de chargement, d'appui et de fixation utilisées pour l'essai doivent représenter celles qui s'appliquent dans la pratique.

NOTE Des guides de bonne pratique définissent des conditions pratiques conventionnelles pour des applications spécifiques.

NOTE **A** :	Pour les plaques profilées et les plateaux, les principaux guides de bonne pratique nationaux sont les Normes, les Documents Techniques Unifiés, les Guides d'Avis Techniques et certaines Règles Professionnelles. On peut citer : - les normes suivantes : NF P 34-503, NF P 34-205-1 et NF P 84-206-1 ; - la méthode générale d'essai des bacs métalliques utilisés en planchers en vue de leur justification de résistance en phase de montage - Méthodologie d'essai et principe de dimensionnement (Cahiers CSTB - Livraison 268 - Avril 1986) ; - les Règles Professionnelles pour la fabrication et la mise en œuvre des Bardages Métalliques - Janvier 1981 - 2ème édition.

(6) Il convient que la vitesse de mise en charge soit telle que le comportement puisse être considéré comme quasi-statique.

(7) Il convient de réaliser un enregistrement complet du comportement charge-déformation, comprenant un nombre approprié de mesures pour chaque variable mesurée.

(8) Les essais peuvent être réalisés au moyen de l'une des méthodes suivantes :

- chargement par paliers ;
- machines à chargement et pilotage en continu ;
- équipement d'essai muni de dispositifs de chargement en continu, tels que baudruches ou caisson.

(9) Pour le chargement par paliers, il convient de déterminer les paliers à partir du comportement charge-déformation prévu, et il convient que leur nombre soit suffisant pour rendre compte complètement du comportement de l'éprouvette. Il convient de mesurer les déformations aux points critiques à chaque palier de charge.

(10) Pendant l'application de la charge, jusqu'à l'obtention de la charge de service, on peut supprimer la charge puis l'appliquer à nouveau. Dans ce but, la charge de service peut être prise égale à la charge de calcul à l'état limite de service pour la combinaison caractéristique (rare) telle que définie dans l'ENV 1991-1. Au-dessus de la charge de service, il convient de maintenir le chargement constant à chaque palier, jusqu'à ce que toute déformation dépendant du temps et résultant du comportement plastique soit devenue négligeable.

NOTE : Dans l'ENV 1991-1, la combinaison caractéristique (rare) est appelée " combinaison rare ".

(10) **I** Clause supprimée.

(11)P Un rapport d'essai doit être rédigé et doit donner les informations suivantes :

a) une description de l'essai ;

b) un schéma indiquant la géométrie de la structure ou du composant ;

c) un schéma indiquant les positions des points de chargement ainsi que les emplacements des appareils de mesure ;

d) des détails de la méthode et de la procédure de chargement ;

e) les mesures des dimensions réelles de la structure ou du composant ;

f) des flèches et déformations mesurées pendant l'essai, correspondant à chaque étape de chargement ou de déchargement ;

g) un relevé de toutes autres observations pendant l'essai.

(11) **A** h) les caractéristiques du matériau constitutif de la structure ou du composant.

(12) Il convient que le rapport d'essai soit complété d'une évaluation de la résistance de la structure ou du composant.

9.3 Tableaux de charges basés sur des essais

9.3.1 Généralités

(1) Des tableaux de charges donnant la capacité portante de composants structuraux spécifiques peuvent être basés totalement sur les résultats d'essais, ou être basés sur une combinaison d'essais et d'analyse rationnelle.

(2) De tels tableaux de charge peuvent représenter les performances d'un élément lorsqu'il est utilisé dans le cadre d'un système structural spécifique dans lequel son comportement est influencé par l'interaction avec l'enveloppe et d'autres composants de la structure.

(3) Si les performances d'un système reposent sur l'effet stabilisateur de matériaux associés, tels que des plaques sur des systèmes de pannes de toiture, il convient que les tableaux de charges basés sur des essais énoncent clairement les conditions nécessaires de validité en ce qui concerne les matériaux associés et leurs méthodes de fixation.

(4) Lors de l'élaboration de tableaux de charges, il convient de tenir compte de la possibilité que les critères d'état limite de service appropriés, plutôt que la résistance de calcul à l'état limite ultime, déterminent la capacité portante.

(5) Au moyen des essais réalisés, il convient de vérifier que, sous la combinaison caractéristique (rare) d'état limite de service, voir l'ENV 1991-1, la barre ne présente aucune déformation locale significative ni aucune déformation permanente significative.

NOTE Dans l'ENV 1991-1, la combinaison caractéristique (rare) est appelée "combinaison rare".

9.3.2 Tableaux basés totalement sur des essais

(1) Si les tableaux de charges sont basés totalement sur des essais, il convient que ceux-ci couvrent de manière appropriée toute la gamme de géométries et de conditions de chargement à inclure dans les tableaux de charges, et il convient que les conditions d'appui ainsi que les assemblages utilisés dans les essais correspondent à ceux mentionnés dans les tableaux de charges.

(2) Il convient en général d'éviter les extrapolations. Toutefois, on peut utiliser une extrapolation limitée lorsqu'elle peut être justifiée sur la base d'une analyse spécifique et appropriée des résultats d'essais, à condition qu'il puisse être démontré que cette extrapolation ne conduit pas à des conditions susceptibles de donner lieu à un mode de ruine différent.

9.3.3 Tableaux basés sur une combinaison d'essais et d'analyse.

(1) Comme alternative au paragraphe 9.3.2, des tableaux de charges peuvent être basés sur une analyse rationnelle assistée par des essais. Il convient que le modèle mathématique de la résistance tienne compte de tous

les modes de ruine possibles dans le domaine des tableaux de charges. Il convient de valider ce modèle mathématique par des essais.

(2) La validation du modèle mathématique peut être réalisée au moyen d'essais en vraie grandeur réalisés sur une partie totalement représentative d'une structure, comprenant les composants et assemblages de la structure, ainsi que les matériaux associés et leurs modes de fixation utilisés en service.

(3) De manière alternative, le modèle mathématique peut être validé par la réalisation d'essais séparés sur tous les profilés, assemblages et autres composants de la structure, afin de déterminer leur résistance et leur rigidité, ainsi que le maintien en rotation conféré aux profilés par l'enveloppe. Il convient que cette analyse tienne également compte de tous les modes de ruine possibles dans le domaine des tableaux de charges. S'il existe un doute à ce sujet, il convient de procéder à un nombre suffisant d'essais en vraie grandeur tels que ceux décrits en (2) afin de lever le doute.

(4) Pour comparer les résultats d'un essai avec ceux du modèle mathématique, il convient d'utiliser l'épaisseur et la limite d'élasticité réelles du composant critique.

(5)P Des coefficients de sécurité appropriés doivent être appliqués. Le modèle mathématique peut être ajusté afin de respecter cette prescription.

NOTE Des informations concernant les méthodes appropriées sont données dans l'annexe A.

A

9.4 Cas particuliers

9.4.1 Toitures en tôles d'acier nervurées

Les performances des tôles d'acier nervurées déterminées selon les dispositions du DTU 43-3 (notamment en son annexe F) sont définies conformément aux principes du présent DAN ENV 1993-1-3 et sont, par conséquent, utilisables lorsque les tôles d'acier nervurées support d'isolation et de revêtement d'étanchéité sont intégrées à une construction de classe I, II ou III.

Cependant, pour les constructions de classes I et II, le prescripteur qualifié d'une telle solution (Maître d'œuvre, Bureau d'Etudes, Entreprise de charpente) a à établir un cahier par l'entreprise de pose en complément de celles du DTU 43-3.

Les dispositions complémentaires visées concernent notamment la valeur des charges à prendre en compte, le choix des fixations et les éléments de choix des matériaux en matière de durabilité. Les dispositions peuvent aussi concerner : la conception globale du bâtiment (exemple : partition), la conception de l'ouvrage de toiture (exemples : connecteurs, couturage), le montage (exemple : stabilisation provisoire), l'entretien, la rénovation et la maintenance.

Au besoin les documents particuliers du marché définissent si une réception des travaux est à réaliser par le prescripteur.

9.4.2 Couvertures et bardages en plaques nervurées, en plaques ondulées ou en plateaux.

Les performances des plaques nervurées, des plaques ondulées ou des plateaux déterminées selon les dispositions des textes de référence les concernant (NF P 34-205-1, Règles Bardages, Avis Techniques) ne sont pas strictement définies conformément aux principes du présent DAN ENV 1993-1-3.

Ces performances peuvent être utilisées lorsque ces produits ne sont pas considérés pour contribuer à la stabilité locale ou globale de l'ossature (Constructions de classe III) ou lorsqu'il ne s'agit que d'empêcher le flambement de la semelle fixée aux plaques ou plateaux et de résister à la composante, dans le plan parallèle aux plaques, de la charge descendante (cas particulier de constructions de classe II). Dans ce dernier cas, il y a lieu de vérifier également la résistance de l'assemblage entre plaques et éléments d'ossature.

Pour les cas autres que ceux précités et pour les constructions de classe I, il convient de déterminer les performances des plaques profilées ou des plateaux, autrement :

- ou par calcul ;
- ou par calculs et essais exécutés et interprétés selon les dispositions du présent DAN ENV 1993-1-3 ;
- ou par calculs et essais exécutés et interprétés selon les dispositions inspirées de celles du DTU 43-3. Cela peut notamment se traduire par une simple interprétation modifiée des résultats des essais disponibles en considérant des coefficients et des définitions de charges plus adaptés.

En tout état de cause, la nécessité subsiste, qu'à l'initiative du prescripteur d'une construction de classe I ou II soit établi un cahier des Clauses Techniques Particulières et qu'à l'issue des travaux, une éventuelle réception soit faite (voir 9.4.1).

10 Applications particulières

10.1 Poutres maintenues par des plaques

10.1.1 Généralités

(1) Les dispositions données dans le présent article 10.1 peuvent être appliquées aux pannes ayant une section en forme de Z, C, Σ ou similaire, avec un maintien latéral total continu sur une semelle. Les pannes peuvent être dimensionnées par calcul, par essais conformément à la section 9, ou par une combinaison de calcul et d'essais.

(2) Ces dispositions peuvent également être appliquées aux profilés formés à froid utilisés comme lisses, poutres de plancher et autres types de poutres similaires maintenues de manière analogue par des plaques.

(3) Les lisses peuvent être calculées en considérant que la pression du vent exerce sur elles une action similaire à la charge de gravité sur les pannes, et que la succion du vent agit sur elles de façon similaire au soulèvement sur les pannes.

(4) Le maintien latéral continu total peut être assuré par des plaques nervurées en acier ou autres plaques profilées en acier possédant une rigidité suffisante, assemblées de façon continue sur la semelle supérieure de la panne au travers des plages ou fonds de nervure des plaques. Dans d'autres cas (par exemple, fixation en sommet de nervures des plaques), il convient que le degré de maintien soit, ou bien validé par l'expérience, ou bien déterminé à partir d'essais conformément à la section 9.

(5) A moins que d'autres configurations d'appui puissent être justifiées à partir de résultats d'essais conformément à la section 9, il convient que la panne soit munie de dispositifs d'appui, tels que échantignoles qui empêchent la rotation et le déplacement latéral au droit de ses appuis. Il convient de prendre en compte les effets des efforts dans le plan des plaques, qui sont transmis aux appuis de la panne, dans la conception des détails d'appui.

(6) Il convient de modéliser le comportement d'une panne maintenue latéralement comme illustré sur la figure 10.1. L'assemblage de la panne sur les plaques peut être considéré comme un maintien partiel en rotation de la panne. Ce maintien partiel en rotation peut être représenté par un ressort de rotation avec une rigidité élastique C_D. Il convient alors de calculer les contraintes s'exerçant dans la semelle libre, non directement assemblée aux plaques, en superposant les effets de flexion dans le plan et les effets de torsion, y compris la flexion latérale résultant de la déformation de la section transversale.

Panne de section en Z ou en C dont la semelle supérieure est fixée aux plaques :

- charge de gravité.

Panne de section en Z ou en C . dont la semelle supérieure est fixée aux plaques :

- charge de soulèvement.

La déformation totale se divise en deux parties :

- torsion et flexion latérale ;

- flexion dans le plan.

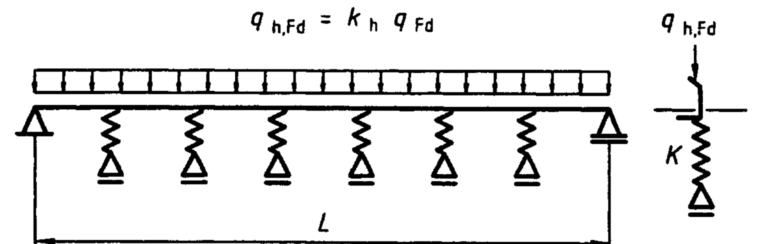
Panne modélisée comme contreventée latéralement avec maintien élastique en rotation C_D assuré par les plaques.

Par simplification, on remplace le ressort de rotation C_D par un ressort latéral de rigidité K.

Modèle de calcul simplifié utilisé en 10.1.4.



Semelle libre de la panne modélisée comme une poutre sur des fondations élastiques.



Modèle représentant les effets de la torsion et de la flexion latérale (y compris la déformation de section transversale) sur une panne en simple portée avec charge de soulèvement.

Figure 10.1 : Modélisation de pannes contreventées latéralement et maintenues en rotation par les plaques

(7) Lorsque la semelle libre d'une panne de portée simple est comprimée sous l'effet du soulèvement, il convient également de tenir compte de l'amplification des contraintes due à la torsion et à la déformation de la section transversale.

10.1.2 Méthodes de calcul

(1) Sauf dans le cas où une analyse de second ordre est effectuée, il convient d'utiliser la méthode donnée en 10.1.3 et 10.1.4 pour tenir compte de la tendance de la semelle libre à se déplacer latéralement (générant ainsi des contraintes supplémentaires) en la traitant comme une poutre soumise à une charge latérale $q_{h,Fd}$, voir figure 10.1.

(2) Dans le cadre de cette méthode, il convient de remplacer le ressort de rotation par un ressort linéaire latéral équivalent de rigidité K. Pour la détermination de K, il convient également de prendre en compte les effets de la déformation de section transversale. Pour ce faire, la semelle libre peut être traitée comme une barre comprimée soumise à un effort axial non uniforme, avec un appui élastique latéral continu de rigidité K.

(3) Si la semelle libre d'une panne est comprimée en raison d'une flexion dans le plan (par exemple à cause du soulèvement dans une panne en portée simple), il convient également de vérifier la résistance de la semelle libre au flambement latéral.

(4) Pour un calcul plus précis, il convient d'effectuer une analyse de second ordre en utilisant les valeurs de rigidité en rotation C_D obtenues d'après 10.1.5.2. Il convient de tenir compte des effets d'une imperfection initiale en arc de $L/500$ dans la semelle libre, où L représente la portée.

(4) I Pour un calcul plus précis, il convient d'effectuer une analyse au second ordre en utilisant la valeur de la rigidité en rotation C_D obtenue d'après 10.1.5.2. Il convient de tenir compte, dans cette analyse, des effets d'une imperfection initiale équivalente en arc $e_{0,d}$ de la semelle libre, calculée comme suit :

- si $\gamma_{M1} = 1{,}00$ $\quad e_{0,d} = \alpha.(\bar{\lambda} - 0{,}2)\,\dfrac{W_{fz}}{A_f}$

- si $\gamma_{M1} = 1{,}10$ $\quad e_{0,d} = k\gamma.\alpha.(\bar{\lambda} - 0{,}2)\,\dfrac{W_{fz}}{A_f}$

avec, si $\bar{\lambda} \leq 0{,}5 \quad k\gamma = 1$

$\bar{\lambda} > 0{,}5 \quad k\gamma = 0{,}77 + 0{,}46\,\bar{\lambda}$

- Pour des valeurs différentes de γ_{M1}, il convient de déterminer l'imperfection initiale équivalente en arc $e_{0,d}$ conformément à la figure 5.5.1 de l'ENV 1993-1-1.

Dans les expressions de l'imperfection initiale équivalente en arc $e_{0,d}$:

α est le facteur d'imperfection relatif à la courbe de flambement a (facteur d'imperfection $\alpha = 0{,}21$) ;

$\bar{\lambda}$ est l'élancement relatif latéral de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur de l'âme, fondé sur une évaluation de la charge critique de cette partie de section ;

W_{fz} est le module de résistance élastique brut de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur de l'âme pour la flexion latérale ;

A_f est l'aire de la section transversale brute de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur de l'âme.

(5) On peut également utiliser une analyse de second ordre faisant appel à la rigidité élastique en rotation C_D obtenue d'après 10.1.5.2 si le maintien latéral n'est pas assuré ou si son efficacité ne peut être démontrée.

10.1.3 Critères de calcul

10.1.3.1 Pannes sur appuis simples

(1) Pour le chargement de gravité, il convient qu'une panne sur appuis simples satisfasse les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1. Si elle est soumise à une compression axiale, il convient également qu'elle satisfasse les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

(1) **I** Pour les charges descendantes, il convient qu'une panne sur appuis simples satisfasse les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1. Si elle est soumise à une compression axiale, il convient également qu'elle satisfasse les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

(2) En ce qui concerne la charge de soulèvement, il convient qu'une panne sur appuis simples satisfasse les critères de résistance de section transversale données en 10.1.4.1 ainsi que les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

10.1.3.2 Pannes continues en deux travées

(1) Les moments dus au chargement de gravité s'exerçant sur une panne physiquement continue en deux travées sans emboîtement ni éclissage peuvent être déterminés soit par calcul, soit à partir de résultats d'essais.

(1) **I** Les moments dus aux charges descendantes s'exerçant sur une panne physiquement continue en deux travées sans emboîtement ni éclissage peuvent être déterminés soit par calcul, soit à partir de résultats d'essais.

(2) Si les moments sont déterminés par calcul, il convient qu'ils soient déterminés à l'aide d'une analyse globale élastique. Il convient que la panne satisfasse les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1. En ce qui concerne le moment au droit de l'appui intermédiaire, il convient que les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2 soient également satisfaits.

(2) **A** Au droit de l'appui intermédiaire, il convient de tenir compte, pour l'évaluation de la résistance, de l'interaction entre le moment fléchissant et l'effort tranchant et si nécessaire de l'interaction entre le moment fléchissant et la réaction d'appui.

(3) Comme alternative, les moments peuvent être déterminés à l'aide de résultats d'essais conformément à la section 9, relatifs au comportement moment-rotation de la panne au droit de l'appui intermédiaire.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données dans l'annexe A.

(4) Il convient de déterminer la valeur de calcul du moment résistant au droit des appuis $M_{\text{sup,Rd}}$ pour une valeur donnée de la charge par unité de longueur q_{Fd}, à partir de l'intersection de deux courbes représentant les valeurs de calcul de :

- la caractéristique de moment-rotation sur l'appui, obtenue par des essais conformes aux dispositions de la section 9 ;
- la relation théorique entre le moment d'appui $M_{\text{sup,Sd}}$ et la rotation de rotule plastique correspondante ϕ_{Ed} dans la panne au droit de l'appui.

(4) **A** Pour la détermination de la valeur finale à adopter pour $M_{\text{sup,Rd}}$, il convient d'intégrer la minoration liée à la stabilité de la semelle libre au voisinage de l'appui intermédiaire.

(5) Il convient alors de déterminer les moments en travée à partir de la valeur du moment d'appui.

(6) Les formules suivantes peuvent être utilisées pour une panne dont les deux portées sont égales :

$$\phi_{Ed} = \frac{L}{12EI_{eff}}\left[q_{Fd}L^2 - 8M_{\text{sup},Sd}\right] \quad \text{... (10.1)}$$

$$M_{spn,Sd} = \frac{(q_{Fd} L^2 - 2M_{sup,Rd})^2}{8q_{Fd} L^2} \quad \text{... (10.2)}$$

où :

I_{eff} est le moment d'inertie de section efficace pour le moment $M_{sup,Sd}$;

L est la portée ;

$M_{spn,Sd}$ est le moment maximum en travée.

(7) Il convient de déterminer par calcul les formules applicables à une panne dont les deux portées sont inégales.

(7) **A** Il convient également de déterminer par calcul les formules applicables à une panne soumise à un chargement qui n'est pas uniformément réparti.

(8) Il convient que le moment maximum en travée $M_{spn,Sd}$ dans la panne satisfasse les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1. Comme alternative, le moment résistant en travée peut être déterminé par des essais conformes aux dispositions de la section 9, réalisés sur une travée simple avec une portée comparable à la distance séparant les points d'inflexion dans la travée.

10.1.3.3 Pannes continues en deux travées sous charge de soulèvement

(1) Il convient de déterminer les moments résultant du soulèvement dans une panne physiquement continue en deux travées sans emboîtement ni éclissage par une analyse globale élastique.

(2) Il convient que le moment s'exerçant au droit de l'appui intermédiaire satisfasse les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1. Etant donné que la réaction d'appui est un effort de traction, il est inutile de tenir compte de son interaction avec le moment d'appui.

(3) Il convient que les moments en travée satisfassent les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

10.1.3.4 Pannes dont la continuité est assurée par emboîtement ou éclissage

(1) Il convient de déterminer les moments s'exerçant dans les pannes dont la continuité en deux ou plusieurs travées est assurée par emboîtement ou éclissage au droit des appuis intermédiaires en tenant compte des caractéristiques de section efficace et des effets des emboîtements ou éclisses.

(2) Il convient de réaliser des essais conformes aux dispositions de la section 9 sur les détails d'appuis afin de déterminer :

- la rigidité de flexion de la partie emboîtée ou éclissée ;
- la caractéristique moment-rotation de la partie emboîtée ou éclissée ;
- la résistance de la partie emboîtée ou éclissée à la combinaison de moment et de réaction d'appui ;
- la résistance de la partie non emboîtée et non éclissée à la combinaison d'effort de cisaillement et de moment fléchissant.

(3) En ce qui concerne la charge de gravité, il convient que la panne satisfasse les critères suivants :

(3) **I** En ce qui concerne les charges descendantes, il convient que la panne satisfasse les critères suivants :

- au droit des appuis intermédiaires, la résistance à la combinaison de moment et de réaction d'appui déterminée par des essais ;
- à proximité des appuis, la résistance à la combinaison d'effort de cisaillement et de moment fléchissant déterminée par des essais ;

- dans les travées, les critères de résistance de section transversale donnés en 10.1.4.1 ;
- si la panne est soumise à une compression axiale, les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.4.1.2.

(4) En ce qui concerne la charge de soulèvement, il convient que la panne satisfasse les critères suivants :

- au droit des appuis intermédiaires, la résistance à la combinaison de moment et de réaction d'appui déterminée par des essais, en tenant compte du fait que la réaction d'appui est un effort de traction dans ce cas ;
- à proximité des appuis, la résistance à la combinaison d'effort de cisaillement et de moment fléchissant déterminée par des essais ;
- dans les travées, les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

10.1.3.5 Critères d'états limites de service

(1) Il convient que les critères d'états limites de service concernant les pannes donnés dans la section 7 soient également satisfaits.

10.1.4 Résistance de calcul

10.1.4.1 Résistance des sections transversales

(1) Pour une panne soumise à un effort axial et à une charge transversale, il convient de vérifier la résistance de la section transversale comme indiqué sur la figure 10.2 en superposant les contraintes dues :

- au moment fléchissant dans le plan $M_{y,Sd}$;
- à l'effort axial N_{Sd} ;
- à la charge latérale $q_{h,Fd}$ agissant sur la semelle libre, résultant de la torsion et de la flexion latérale, voir (3).

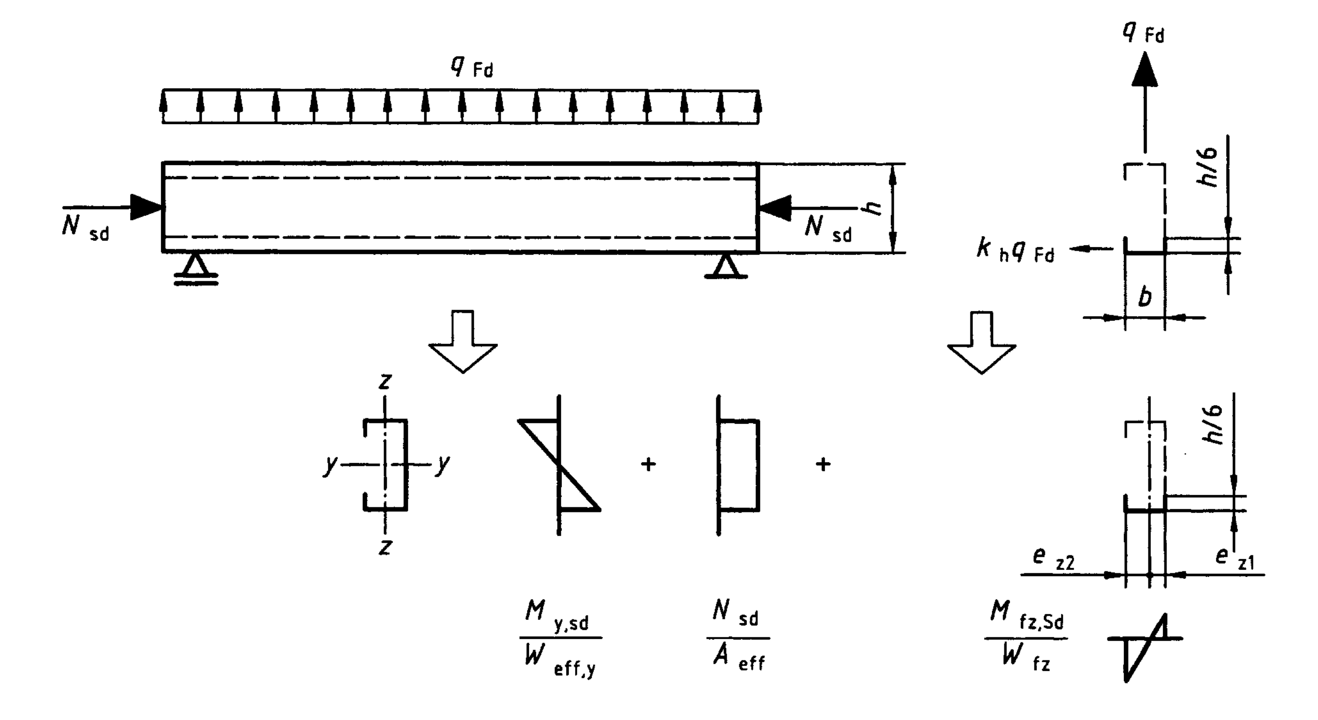


Figure 10.2 : Superposition des contraintes

(2) Il convient que les contraintes maximales dans la section transversale satisfassent les critères suivants :

- pour la semelle maintenue :

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Sd}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Sd}}{A_{eff}} \leq f_y / \gamma_M \quad \text{... (10.3a)}$$

- pour la semelle libre :

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Sd}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Sd}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Sd}}{W_{fz}} \leq f_y / \gamma_M \quad \text{... (10.3b)}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale pour la compression uniforme ;

f_y est la limite d'élasticité définie en 3.1.1(6)P ;

$M_{fz,Sd}$ est le moment fléchissant dans la semelle libre résultant de la charge latérale $q_{h,Fd}$;

$W_{eff,y}$ est le module de résistance efficace de la section transversale pour la flexion selon l'axe y - y ;

W_{fz} est le module de résistance élastique brut de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur de l'âme, pour la flexion par rapport à l'axe z - z ;

et $\gamma_M = \gamma_{M0}$ si $A_{eff} = A_{el}$ ou si $W_{eff,y} = W_{el,y}$ et $N_{Sd} = 0$, sinon $\gamma_M = \gamma_{M1}$.

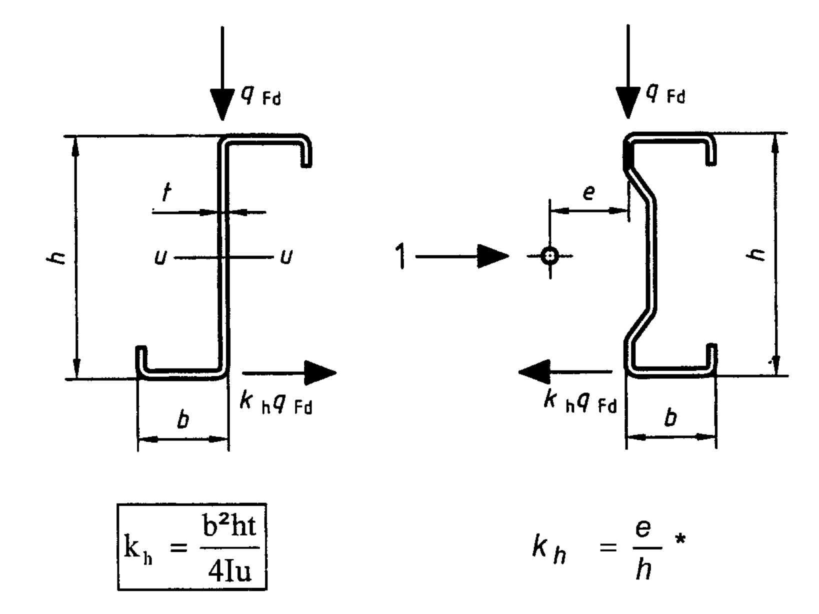
(3) Il convient de déterminer la charge latérale $q_{h,Fd}$ agissant sur la semelle libre, résultant de la torsion et de la flexion latérale, par :

$$q_{h,Fd} = k_h \, q_{Fd} \quad \text{... (10.4)}$$

(4) Il convient de déterminer le coefficient k_h comme indiqué sur la figure 10.3 pour les types courants de section transversale.

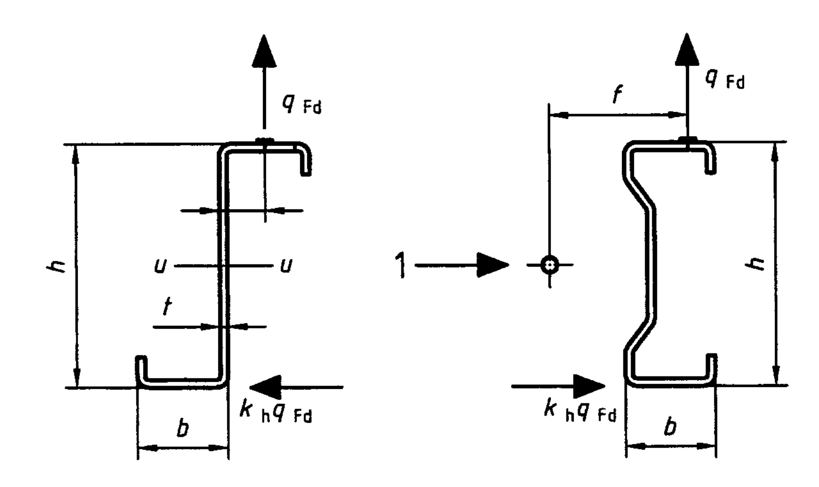
(4) **C**	Le cas échéant, des valeurs précises de k_h peuvent être déterminées par calcul.

1) centre de cisaillement

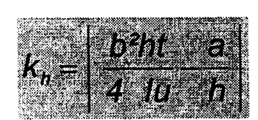


a) Charge descendante

1) centre de cisaillement



A	Convention de signe :	K_h positif : ←	K_h négatif :→



I

$$k_h = \frac{b^2ht}{4Iu} - \frac{a}{h}$$

$$k_h = \frac{f}{h}\ *$$

b) Charge de soulèvement

(*) **A** Si le centre de cisaillement se trouve à droite de q_{Fd}, la charge latérale agit dans la direction opposée.

Figure 10.3 : Conversion de la torsion en flexion latérale de la semelle libre

(5) Il convient de prendre le moment fléchissant latéral $M_{fz,Sd}$ égal à zéro si la semelle libre est tendue, sinon il convient de déterminer $M_{fz,Sd}$ par :

$$M_{fz,Sd} = \beta_R M_{0,fz,Sd} \qquad \text{... (10.5)}$$

où :

$M_{0,fz,Sd}$ est le moment fléchissant latéral initial dans la semelle libre sans maintien élastique ;

β_R est le coefficient de correction pour le maintien élastique effectif.

(6) Il convient de déterminer le moment fléchissant latéral initial dans la semelle libre $M_{0,fz,Sd}$ à l'aide du tableau 10.1 pour les sections critiques en travée, au droit des appuis, au droit des liernes et entre les liernes.

Tableau 10.1 : Valeurs du moment initial $M_{0,fz,Sd}$ et coefficient de correction β_R

Système	Section	$M_{0,fz,Sd}$	β_R
m; 1/2 L_a ; 1/2 L_a	m	$\frac{1}{8} q_{h,Fd} L_a^2$	$\beta_R = \frac{1-0{,}0225R}{1+1{,}013R}$
m, e; 3/8 L_a ; 5/8 L_a	m	$\frac{9}{128} q_{h,Fd} L_a^2$	$\beta_R = \frac{1-0{,}0141R}{1+0{,}416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Fd} L_a^2$	$\beta_R = \frac{1+0{,}0314R}{1+0{,}396R}$
e, m; 1/2 L_a ; 1/2 L_a	m	$\frac{1}{24} q_{h,Fd} L_a^2$	$\beta_R = \frac{1-0{,}0125R}{1+0{,}198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Fd} L_a^2$	$\beta_R = \frac{1+0{,}0178R}{1+0{,}191R}$

(7) Il convient de déterminer le coefficient de correction β_R pour la section et les conditions aux limites appropriés à partir du tableau 10.1, en utilisant la valeur du coefficient R de l'appui élastique donnée par :

$$R = \frac{K L_a^4}{\pi^4 E I_{fz}} \qquad \text{... (10.6)}$$

où :

I_{fz} est le moment d'inertie de la section transversale brute de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur d'âme, pour la flexion selon l'axe z - z ;

K est la rigidité élastique latérale par unité de longueur d'après 10.1.5.1 ;

L_a est la distance entre les liernes, ou en cas d'absence de ces dernières, la portée *L* de la panne.

10.1.4.2 Résistance au flambement de la semelle libre

(1) Si la semelle libre est comprimée, il convient de vérifier sa résistance au flambement par :

$$\frac{1}{\chi}\left[\frac{M_{y,Sd}}{W_{eff,y}}+\frac{N_{Sd}}{A_{eff}}\right]+\frac{M_{fz,Sd}}{W_{fz}}\leq f_{yb}/\gamma_{M1} \qquad \text{... (10.7)}$$

où χ représente le coefficient de réduction pour le flambement par flexion de la semelle libre, obtenu d'après 6.2.1(2)P en utilisant la courbe de flambement a (facteur d'imperfection α = 0,21) pour l'élancement relatif $\bar{\lambda}_{fz}$ donné en (2).

(2) Il convient de déterminer l'élancement relatif $\bar{\lambda}_{fz}$ pour le flambement par flexion de la semelle libre par :

$$\bar{\lambda}_{fz}=\frac{\ell_{fz}/i_{fz}}{\lambda_1} \qquad \text{... (10.8)}$$

avec :

$\lambda_1 = \pi\,[E / f_{yb}]^{0,5}$

où :

ℓ_{fz} est la longueur de flambement pour la semelle libre d'après (3) à (7) ;

i_{fz} est le rayon de giration pour la section transversale brute de la semelle libre plus 1/6 de la hauteur d'âme, selon l'axe z - z.

(3) Pour le chargement de gravité, à condition que $0 \leq R \leq 200$, la longueur de flambement de la semelle libre, pour une variation de la contrainte de compression sur la longueur *L* comme indiqué sur la figure 10.4, peut être obtenue par :

(3) **I** Pour les charges descendantes, à condition que $0 \leq R \leq 200$, la longueur de flambement de la semelle libre, pour une variation de la contrainte de compression sur la longueur *L* comme indiqué sur la figure 10.4, peut être obtenue par :

$$\ell_{fz} = \eta_1 L_a (1 + \eta_2 R^{\eta_3})^{\eta_4} \qquad \text{... (10.9)}$$

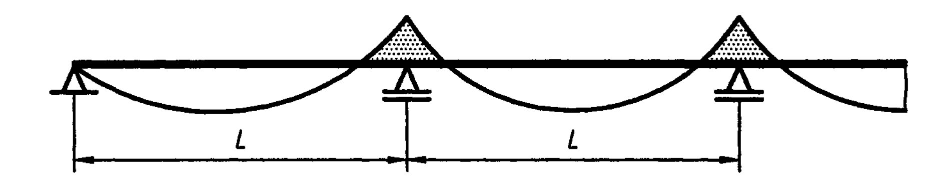
où :

L_a est la distance entre les liernes, ou en cas d'absence de ces dernières, la portée *L* de la panne ;

R est tel qu'indiqué en 10.1.4.1(7) ;

et η_1 à η_4 sont des coefficients qui dépendent du nombre de liernes, comme indiqué dans le tableau 10.2.

(3) **A** Le tableau 10.2 est applicable directement dans le cas de pannes sans emboîtement, ni éclissage, à travées égales, munies le cas échéant de liernes également espacées, soumises à un chargement uniformément réparti sans effort normal de compression. Dans les autres cas, il convient que la longueur de flambement fasse l'objet d'un calcul spécifique, à défaut d'un tel calcul, on peut utiliser les valeurs du tableau 10.2 correspondant à plus de 3 liernes par travée.



(Les zones grisées indiquent les parties comprimées)

Figure 10.4 : Variations de la contrainte de compression dans la semelle libre

pour les cas de charges de gravité

Figure 10.4 **I** pour les cas de charges descendantes.

Tableau 10.2 : Coefficients η_i

Nombre de liernes par travée	η_1	η_2	η_3	η_4
0	0,526	22,8	2,12	- 0,108
1	0,622	66,7	2,68	- 0,084
2 ou 3	0,713	62,7	2,75	- 0,084
plus de 3	1,000	30,4	2,28	- 0,108

(4) Pour le chargement de gravité, s'il existe plus de trois liernes également espacées, il est inutile de prendre la longueur de flambement supérieure à celle pour deux liernes, avec $L_a = L/3$.

(4) **I** Pour les charges descendantes, s'il existe plus de trois liernes également espacées, il est inutile de prendre la longueur de flambement supérieure à celle pour deux liernes, avec $L_a = L/3$.

(4) **C** Cette clause est due au fait que la dernière ligne du tableau 10.2 place largement en sécurité. Cependant, ceci n'est valable qu'en l'absence d'effort normal de compression.

(5) Si la contrainte de compression sur la longueur L est presque constante en raison de l'application d'un effort axial relativement important, il convient de déterminer la longueur de flambement à l'aide des valeurs de η_i prises dans le tableau 10.2 pour plus de trois liernes par portée, mais avec l'espacement réel L_a.

(6) Pour la charge de soulèvement, à condition que $0 \leq R_0 \leq 200$, la longueur de flambement pour la semelle libre, pour les variations de la contrainte de compression sur la longueur L_0 comme indiqué sur la figure 10.5, peut être obtenue par :

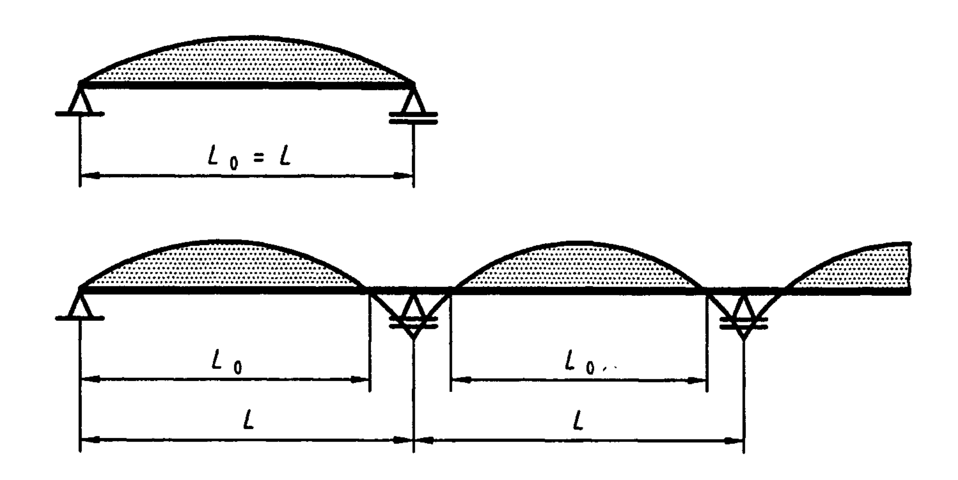
$$\ell_{fz} = 0{,}7L_0\,(1 + 13{,}1\,R_0^{1,6})^{-0,125} \qquad \text{... (10.10a)}$$

avec :

$$R_0 = \frac{K L_0^4}{\pi^4 E I_{fz}} \qquad \text{... (10.10b)}$$

où les valeurs I_{fz} et K sont telles que définies en 10.1.4.1(7).

(6) **C**	La formule 10.10a est seulement applicable en l'absence de tout effort normal de compression.



(Les zones grisées indiquent les parties comprimées)

Figure 10.5 : Variations de la contrainte de compression dans la semelle libre pour les cas de charge de soulèvement

(7) Pour la charge de soulèvement, si la semelle libre est efficacement maintenue latéralement en position par des liernes, la longueur de flambement peut être prise, en se plaçant du côté de la sécurité, égale à celle utilisée pour un moment uniforme, déterminée comme indiqué en (4).

(7) **I**	Pour la charge de soulèvement, si la semelle libre est efficacement maintenue latéralement en position par des liernes, la longueur de flambement peut être prise, en se plaçant du côté de la sécurité, égale à celle utilisée pour un moment uniforme, déterminée comme indiqué en (5).

10.1.5 Maintien en rotation assuré par les plaques

10.1.5.1 Rigidité élastique latérale

(1) Il convient de modéliser le maintien élastique latéral conféré à la semelle libre de la panne par les plaques comme un ressort latéral agissant au niveau de la semelle libre, voir figure 10.1. Il convient de déterminer la rigidité élastique latérale totale K par unité de longueur par :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} \qquad \text{... (10.11)}$$

où :

K_A est la rigidité latérale correspondant à la rigidité en rotation de l'assemblage entre les plaques et la panne ;

K_B est la rigidité latérale résultant de la déformation de la section transversale de la panne ;

K_C est la rigidité latérale résultant de la rigidité de flexion des plaques.

(2) Normalement, on peut considérer qu'il est acceptable du point de vue de la sécurité et réaliste, de négliger $1/K_C$ car la valeur de K_C est très grande par rapport à celles de K_A et de K_B. Il convient alors de déterminer la valeur de K par :

$$K = \frac{1}{(1/K_A + 1/K_B)} \quad \text{... (10.12)}$$

(3) La valeur de ($1/K_A$ + $1/K_B$) peut être obtenue soit par des essais conformes aux dispositions de la section 9, soit par calcul.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données dans l'annexe A.

(4) La rigidité élastique latérale K par unité de longueur peut être déterminée par calcul par la formule :

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)\,h^2\,(h_d + e)}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D} \quad \text{... (10.13)}$$

où la dimension e est déterminée de la façon suivante :

- pour les cas amenant la panne en contact avec les plaques du côté de l'âme de la panne :

$e = a$

- pour les cas amenant la panne en contact avec les plaques du côté de l'extrémité de la semelle de la panne :

$e = 2a + b$

où :

a est la distance entre la fixation plaque-panne et l'âme de la panne, voir figure 10.6 ;

b est la largeur de la semelle de la panne assemblée aux plaques, voir figure 10.6 ;

C_D est la rigidité élastique totale de rotation d'après 10.1.5.2 ;

h est la hauteur hors-tout de la panne ;

h_d est la hauteur développée de l'âme de la panne, voir figure 10.6.

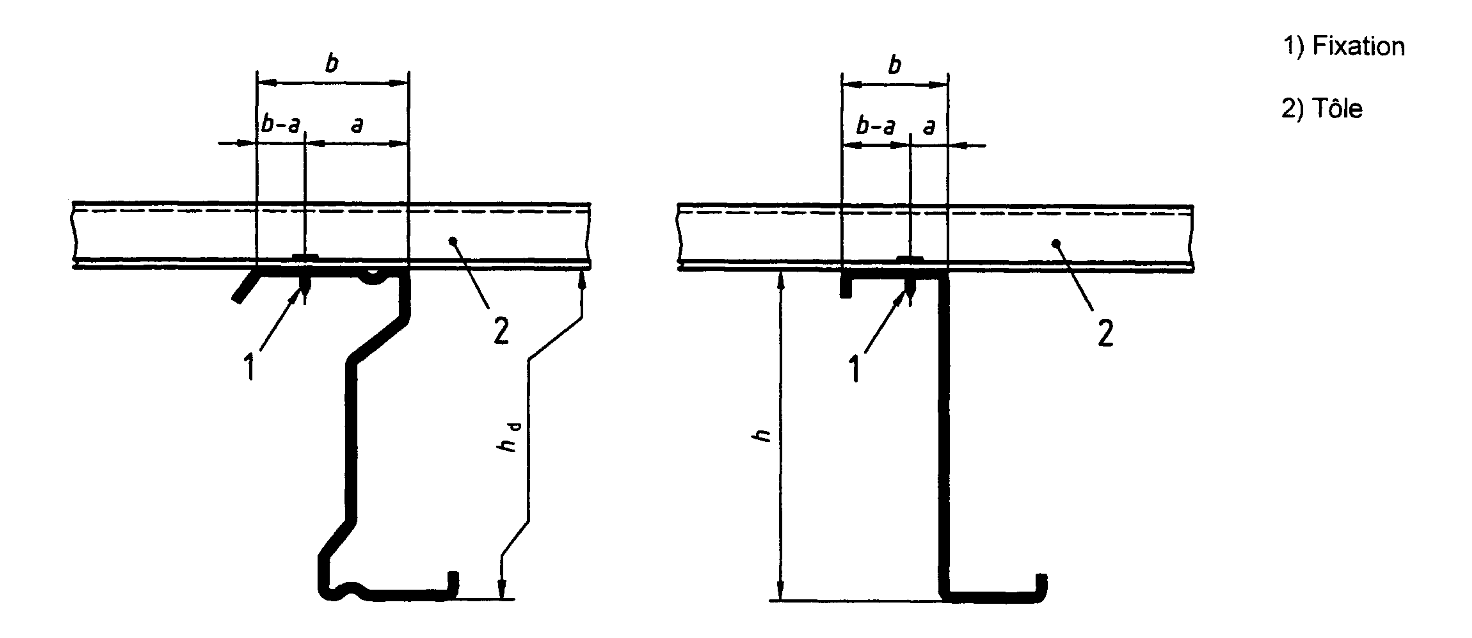


Figure 10.6 : Panne et plaques assemblées

10.1.5.2 Rigidité élastique en rotation

(1) Il convient de modéliser l'encastrement en rotation conféré à la panne par la plaque qui est fixée sur sa semelle supérieure comme un ressort de rotation agissant au niveau de la semelle supérieure de la panne, voir figure 10.1. Il convient de déterminer la rigidité élastique totale en rotation C_D par :

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})} \quad \ldots (10.14)$$

où :

$C_{D,A}$ est la rigidité en rotation de l'assemblage entre la plaque et la panne ;

$C_{D,C}$ est la rigidité en rotation correspondant à la rigidité de flexion des plaques.

(2) En règle générale, $C_{D,A}$ peut être calculé comme indiqué en (5) et (7). Comme alternative, $C_{D,A}$ peut être obtenu par des essais, voir (9).

(3) La valeur de $C_{D,C}$ peut être prise égale à la valeur minimale obtenue à partir des modèles de calcul du type indiqué sur la figure 10.7, en tenant compte des rotations des pannes adjacentes et du degré de continuité des plaques, à l'aide de :

$$C_{D,C} = m / \theta \quad \ldots (10.15)$$

où :

m est le moment par unité de largeur des plaques, appliqué comme indiqué sur la figure 10.7 ;

θ est la rotation résultante, mesurée comme indiqué sur la figure 10.7 [radians].

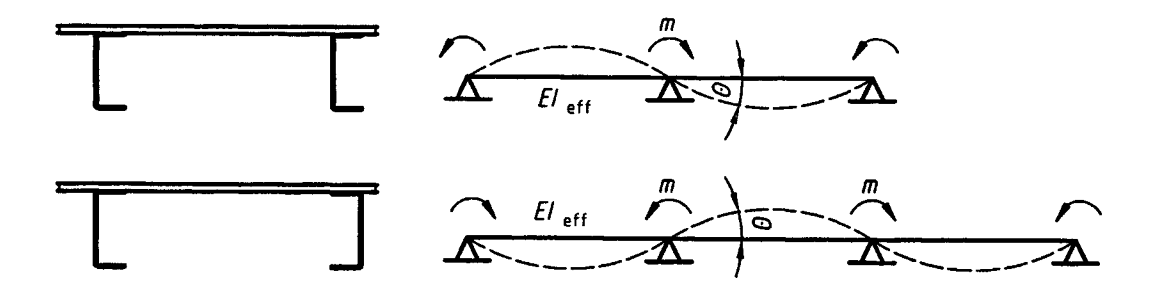


Figure 10.7 : Modèle pour le calcul de $C_{D,C}$

(4) A titre d'alternative, on peut obtenir une valeur de $C_{D,C}$, plaçant du côté de la sécurité, au moyen de l'expression :

$$C_{D,C} = \frac{kEI_{eff}}{s} \quad \dots (10.16)$$

où :

k est un coefficient numérique ayant les valeurs suivantes :

- pour les plaques à simple travée : $k = 2$
- pour les plaques continues en deux ou plusieurs travées : $k = 4$

I_{eff} est le moment d'inertie de section efficace par unité de largeur des plaques ;

s est l'espacement des pannes.

(5) A condition que les fixations plaques-pannes soient positionnées au centre de la semelle de la panne, la valeur de $C_{D,A}$ pour des plaques à nervures trapézoïdales assemblées sur la semelle supérieure de la panne peut être déterminée de la façon suivante :

- si $b_a \leq 125$:

$$C_{D,A} = C_{100}\left[\frac{b_a}{100}\right]^2 \quad \dots (10.17a)$$

- si $125 \leq b_a \leq 200$:

$$C_{D,A} = 1{,}25C_{100}\left[\frac{b_a}{100}\right] \quad \dots (10.17b)$$

où :

b_a est la largeur de la semelle de la panne [en mm] ;

C_{100} est le coefficient de rotation, représentant la valeur de $C_{D,A}$ si b_a = 100 mm.

(6) A condition qu'il n'existe aucune isolation entre les plaques et les pannes, la valeur du coefficient de rotation C_{100} peut être obtenue d'après le tableau 10.3.

Tableau 10.3 : Coefficient de rotation C_{100} pour les plaques à nervures trapézoïdales

Positionnement de la plaque		Tôle fixée au travers		Espacement des fixations		Diamètre des rondelles	C_{100}	$b_{T,max}$
Positif	Négatif	de la plage	du sommet de nervure	$e = b_R$	$e = 2\,b_R$	[mm]	[kN m/m]	[mm]
Pour chargement de gravité : I Pour les charges descendantes								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_a	10,0	40
	×		×		×	K_a	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
Pour soulèvement								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40

Légende :

b_R est l'espacement des nervures [185 mm maximum] ;

b_T est la largeur de la plage de la plaque au travers de laquelle elle est fixée sur la panne.

K_a indique un cavalier en acier tel que celui illustré ci-dessous avec $t \geq 0{,}75$ mm

Plaque fixée :

- au travers de la plage

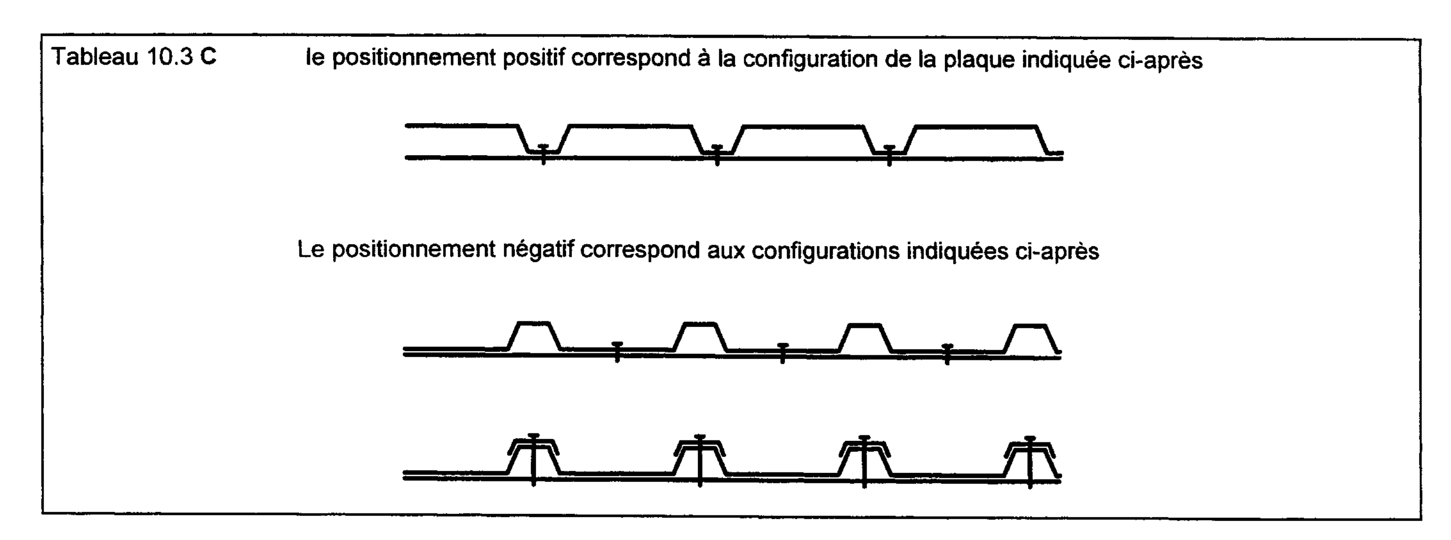
b_t

- au travers du sommet de nervure :

b_t

Les valeurs figurant dans ce tableau sont valables pour :

- des vis de fixation de tôles de diamètre : ϕ = 6,3 mm ;
- des rondelles en acier d'épaisseur : $t_w \geq$ 1,0 mm ;
- des plaques d'épaisseur nominale de métal nu : $t \geq$ 0,66 mm.



(7) Comme alternative, la valeur de $C_{D,A}$ peut être prise égale à 130 p [Nm/m/radian], où p représente le nombre de fixations plaques-pannes par mètre linéaire de panne (mais pas plus d'une par nervure de plaque), à condition que :

- la largeur b de la plage de la plaque au travers de laquelle elle est fixée ne soit pas supérieure à 120 mm ;

- l'épaisseur nominale de métal nu t de la plaque soit d'au moins 0,66 mm ;
- la distance a ou $b - a$ entre l'axe de la fixation et le centre de rotation de la panne (selon le sens de rotation), comme indiqué sur la figure 10.6, soit d'au moins 25 mm.

(8) Si les effets de déformation de section transversale (qui ne sont pas compris dans la rigidité élastique en rotation C_D) sont à prendre en compte, voir 10.1.5.1, on peut considérer qu'il est réaliste de négliger $C_{D,C}$ car la rigidité élastique est principalement influencée par la valeur de $C_{D,A}$ et par la déformation de section transversale.

(9) Comme alternative, les valeurs de $C_{D,A}$ peuvent être obtenues par une combinaison d'essais et de calcul.

(10) Si la valeur de $(1/K_A + 1/K_B)$ est obtenue par des essais, il convient de déterminer les valeurs de $C_{D,A}$ pour le chargement de gravité et pour le soulèvement par :

(10) I Si la valeur de $(1/K_A + 1/K_B)$ est obtenue par des essais, il convient de déterminer les valeurs de $C_{D,A}$ pour les charges descendantes et pour les charges de soulèvement par :

$$C_{D,A} = \frac{h^2}{(1/K_A + 1/K_B) - 4(1-\nu^2)h^2(h_d + e)/(Et^3)} \quad \text{... (10.18)}$$

où e, h et h_d sont définis en 10.1.5.1(4).

10.2 Plateaux maintenus par des plaques

10.2.1 Généralités

(1) Il convient que les plateaux soient des profils en U large, avec deux semelles étroites, deux âmes et une plage large, en général comme illustré sur la figure 10.8. Il convient que les deux semelles étroites soient maintenues latéralement par des plaques nervurées en acier.

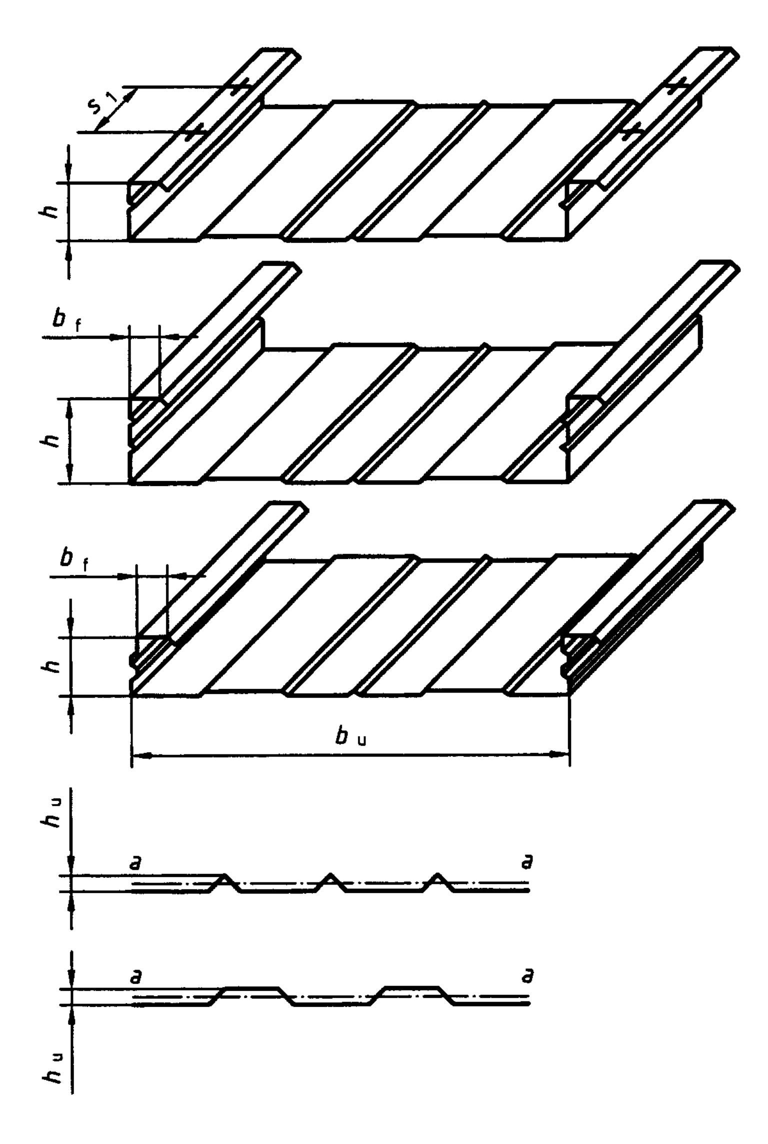


Figure 10.8 : Géométries typiques des plateaux

(2) Il convient de déterminer la résistance des âmes des plateaux aux efforts de cisaillement et aux forces transversales localisées à partir de 5.8 à 5.11 et en utilisant la valeur de $M_{c,Rd}$ donnée par (3) ou (4).

(3) Le moment résistant $M_{c,Rd}$ d'un plateau peut être obtenu par 10.2.2 à condition que :

- les caractéristiques géométriques se situent à l'intérieur du domaine indiqué dans le tableau 10.4 ;
- la profondeur h_u des raidisseurs de la plage ne dépasse pas $h/8$, où h représente la hauteur hors-tout du plateau.

Tableau 10.4 : Domaine de validité du 10.2.2

0,75 mm	≤	t_{nom}	≤	1,5 mm
30 mm	≤	b_f	≤	60 mm
60 mm	≤	h	≤	200 mm
300 mm	≤	b_u	≤	600 mm
		I_a / b_u	≤	10 mm^4/mm
		s_1	≤	1000 mm

(4) Comme alternative, le moment résistant d'un plateau peut être déterminé par des essais conformes aux dispositions de la section 9, à condition de s'assurer que le comportement local du plateau n'est pas affecté par le dispositif d'essai.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données dans l'annexe A.

10.2.2 Moment résistant

10.2.2.1 Plage comprimée

(1) Il convient de déterminer le moment résistant d'un plateau dont la plage est comprimée à l'aide de la méthode pas-à-pas illustrée par la figure 10.9, de la façon suivante :

- **Etape 1** : Déterminer les aires efficaces de tous les éléments comprimés de la section transversale, sur la base de valeurs du rapport de contraintes $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ obtenues en utilisant les largeurs efficaces des semelles comprimées et les aires brutes des âmes ;
- **Etape 2** : Calculer le centre de gravité de la section transversale efficace, puis obtenir le moment résistant $M_{c,Rd}$ à l'aide de :

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_{yb} / \gamma_{M2} \qquad \text{... (10.19)}$$

avec :

$W_{eff,min} = I_{y,eff} / z_c$ mais $W_{eff,min} \leq I_{y,eff} / z_t$

$\gamma_{M2} = \boxed{1,25}$

où z_c et z_t sont tels qu'indiqué sur la figure 10.9.

NOTE L'utilisation de γ_{M2} dans cette expression au lieu de γ_{M0} est nécessaire pour l'étalonnage.

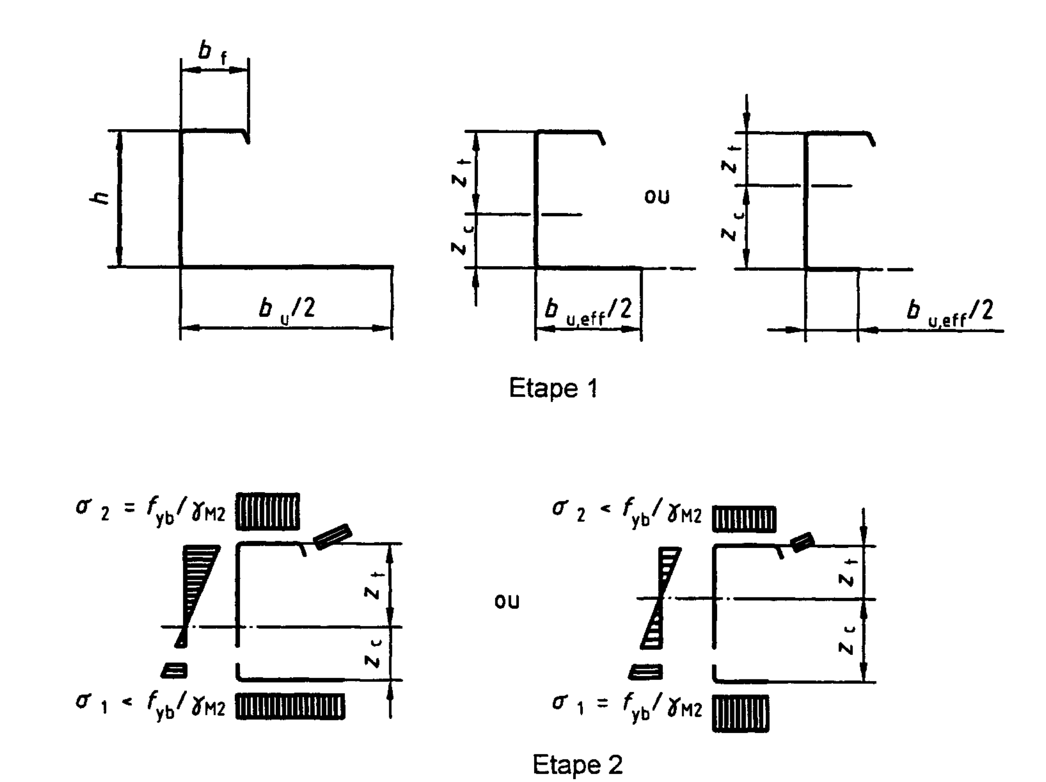


Figure 10.9 : Détermination du moment résistant - Plage comprimée

10.2.2.2 Plage tendue

(1) Le moment résistant d'un plateau dont la plage est tendue doit être déterminé à l'aide de la méthode pas-à-pas illustrée par la figure 10.10, de la façon suivante :

- **Etape 1** : Localiser le centre de gravité de la section transversale brute ;
- **Etape 2** : Obtenir la largeur efficace de la plage $b_{u,eff}$, en tenant compte d'éventuelles raidisseurs de plage, par :

$$b_{u,eff} = \frac{53{,}3 \, x \, 10^{10} e_o^2 t^3 t_{eq}}{hLb_u^3} \qquad \text{... (10.20)}$$

où :

b_u est la largeur hors-tout de la plage ;

e_o est la distance entre l'axe centroïde de la section transversale brute et l'axe centroïde des semelles ;

h est la hauteur hors-tout du plateau ;

L est la portée du plateau ;

t_{eq} est l'épaisseur équivalente de la plage, donnée par :

$t_{eq} = (12 \, I_a / b_u)^{1/3}$

I_a est le moment d'inertie de la plage, par rapport à son propre centre de gravité, voir figure 10.8.

- **Etape 3** : Déterminer les aires efficaces de tous les éléments comprimés, sur la base des valeurs du rapport de contraintes $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ obtenues en utilisant les largeurs efficaces des semelles et les aires brutes des âmes ;
- **Etape 4** : Déterminer le centre de gravité de la section transversale efficace, puis obtenir le moment résistant au flambement $M_{b,Rd}$ à l'aide de :

$$M_{b,Rd} = \beta_b \, W_{eff,com} \, f_{yb} / \gamma_{M2} \quad \text{mais } M_{b,Rd} \leq W_{eff,t} \, f_{yb} / \gamma_{M2} \qquad \text{... (10.21)}$$

avec :

$W_{eff,com} = I_{y,eff} / z_c$

$W_{eff,t} = I_{y,eff} / z_t$

où le coefficient de corrélation β_b est donné par les expressions suivantes :

- si $s_1 \leq 300$ mm :

$\beta_b = 1{,}0$

- si 300 mm $\leq s_1 \leq 1000$ mm :

$\beta_b = 1{,}15 - s_1 / 2000$

où :

s_1 est l'espacement longitudinal des fixations conférant un maintien latéral aux semelles, voir figure 10.8 ;

γ_{M2} = [1,25]

NOTE L'utilisation de γ_{M2} dans cette expression au lieu de γ_{M0} est nécessaire pour l'étalonnage.

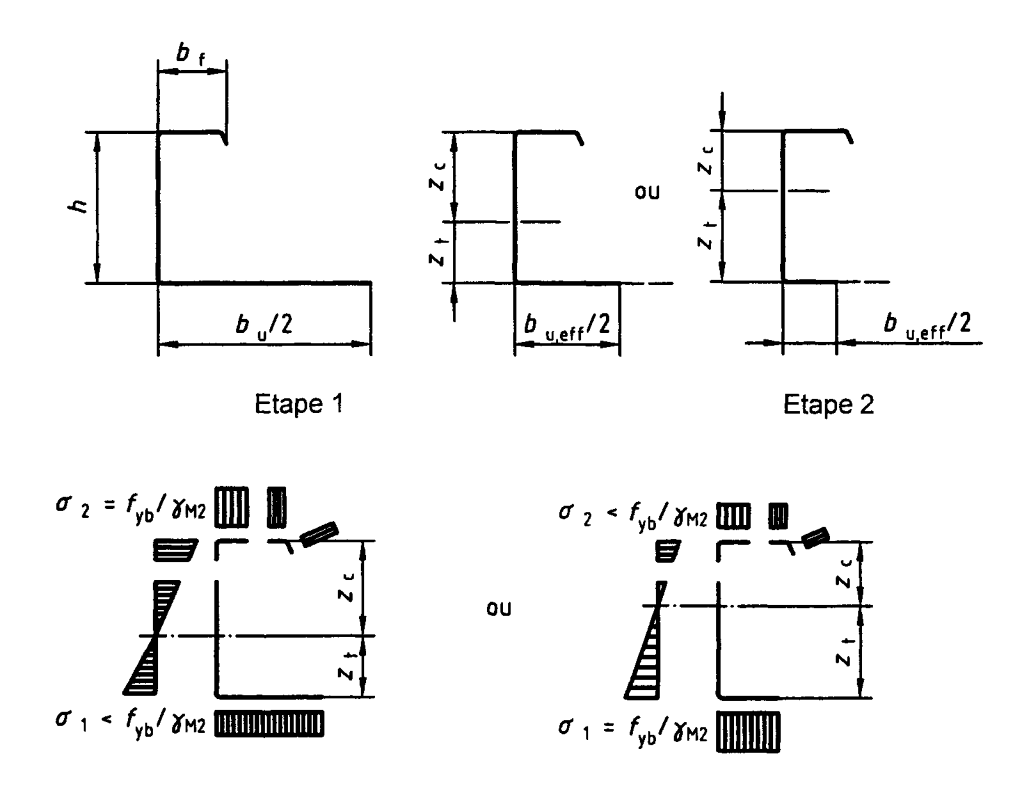


Figure 10.10 : Détermination du moment résistant - Plage tendue

(2) Il est inutile de tenir compte des effets du traînage de cisaillement si $L/b_{u,eff} \geq 20$. Sinon, il convient de déterminer une valeur réduite de ρ comme indiqué au 5.4.3.

(3) Il est inutile de tenir compte de la déformation transversale de la section pour la détermination des flèches aux états limites de service.

(4) Comme alternative simplifiée, le moment résistant d'un plateau comportant une plage non raidie peut être approché en prenant la même aire efficace pour la plage tendue que pour les deux semelles étroites comprimées combinées.

10.3 Dimensionnement avec collaboration de paroi

10.3.1 Généralités

(1)P L'interaction entre les éléments de la structure et les plaques, qui sont conçus pour agir ensemble en tant que parties d'un système structural combiné, peut être prise en compte comme décrit dans le présent article 10.3.

(2)P Les dispositions données dans le présent article ne doivent être appliquées qu'aux diaphragmes faits de tôles d'acier.

(3)P Les diaphragmes peuvent être constitués de plaques nervurées utilisées comme couverture ou bardage ou pour des planchers. Ils peuvent également être constitués de structures de couverture ou bardage avec emploi de plateaux.

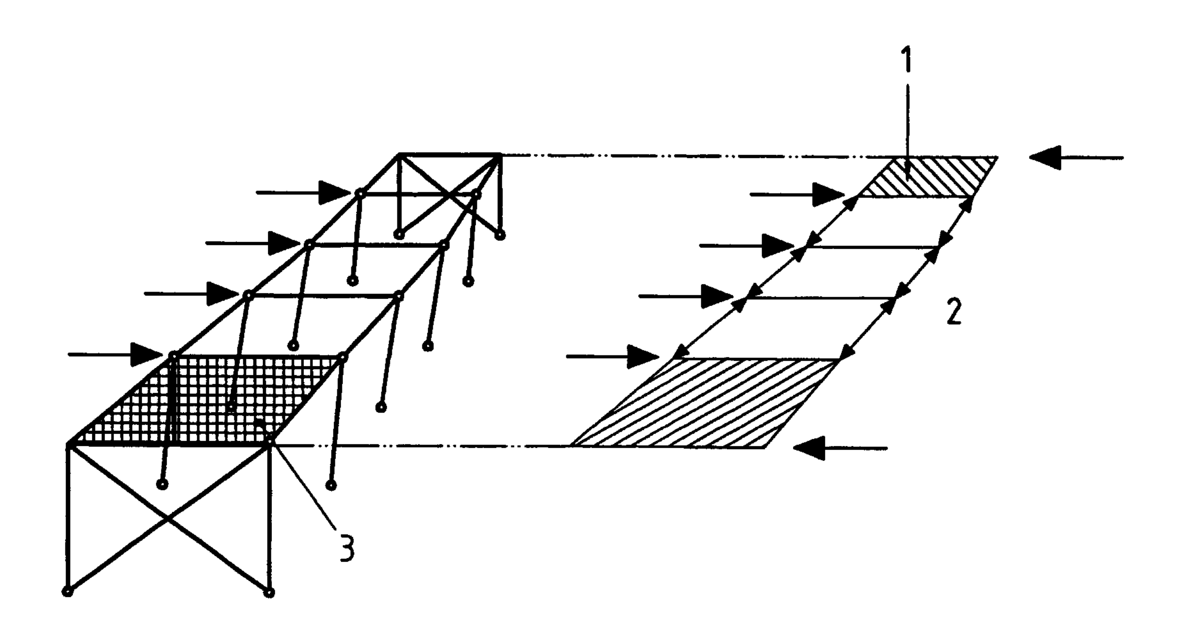
NOTE On peut trouver des recommandations concernant la vérification de tels diaphragmes dans :

Publication CECM n° 88 (1995) : Recommandations européennes pour l'application des tôles d'acier agissant comme diaphragme.

10.3.2 Effet de diaphragme

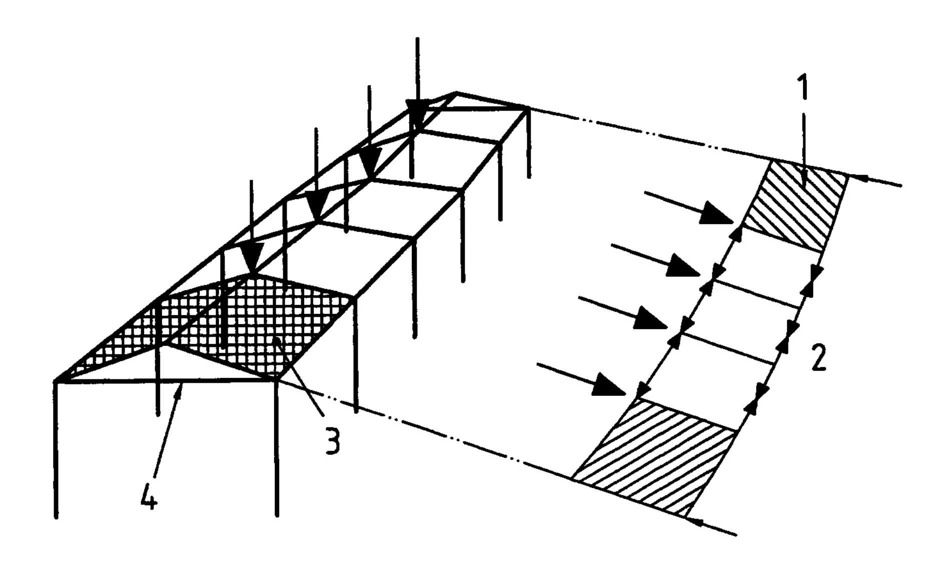
(1)P Dans le dimensionnement avec collaboration de paroi, on peut profiter de la contribution que les diaphragmes de plaques utilisées comme couverture, bardage ou plancher apportent à la rigidité et à la résistance générales de l'ossature en raison de leur rigidité et de leur résistance au cisaillement.

(2) Les toits et les planchers peuvent être traités comme des poutres reconstituées de grande hauteur s'étendant sur toute la longueur d'un bâtiment, résistant aux charges transversales dans leur plan et les transmettant aux pignons d'extrémité ou à des structures raidies intermédiaires. La plaque peut être traitée comme une âme qui résiste à des charges transversales dans son plan en cisaillement, avec les profilés de rive agissant comme des semelles qui résistent aux efforts de traction et de compression axiales, voir figures 10.11 et 10.12.



1) Domaine de cisaillement dans la plaque
2) Efforts de semelle dans les profilés de rive
3) Plaques

Figure 10.11 : Effet de collaboration de paroi dans un bâtiment à toit plat



1) Champ de cisaillement dans les plaques
2) Efforts de semelle dans les profilés de rive
3) Plaques
4) Tirant de pignon indispensable pour résister aux efforts dans les plaques de couverture

Figure 10.12 : Effet de collaboration de paroi dans un bâtiment à toit incliné

(3) De façon similaire, les panneaux rectangulaires de façades peuvent être traités comme des systèmes de contreventement qui agissent comme des diaphragmes de cisaillement pour résister aux efforts dans leur plan.

10.3.3 Conditions nécessaires

(1)P Les méthodes de dimensionnement avec collaboration de paroi qui exploitent les plaques comme partie intégrante d'une structure peuvent être utilisées uniquement sous réserve des conditions suivantes :

- l'utilisation des plaques, outre leur but premier, est limitée à la constitution de diaphragmes de cisaillement destinés à résister au déplacement de la structure dans le plan de ces plaques ;

- les diaphragmes sont munis de profilés de rive longitudinaux destinés à résister aux efforts de semelle générés par l'effet de diaphragme ;

- les efforts de diaphragme dans le plan d'un toit ou d'un plancher sont transmis aux fondations au moyen de structures contreventées, d'autres diaphragmes avec collaboration de paroi, ou d'autres méthodes de contreventement ;

- des assemblages structuraux appropriés sont utilisés pour transmettre les efforts de diaphragme à la structure principale en acier et pour solidariser les profilés de rive jouant le rôle de semelles ;

- les plaques sont traitées comme un composant de la structure qui ne peut être ôté de manière inconsidérée ;

- le cahier des charges du projet, comprenant les calculs et les dessins, attire l'attention sur le fait que le bâtiment est dimensionné en utilisant la collaboration de paroi.

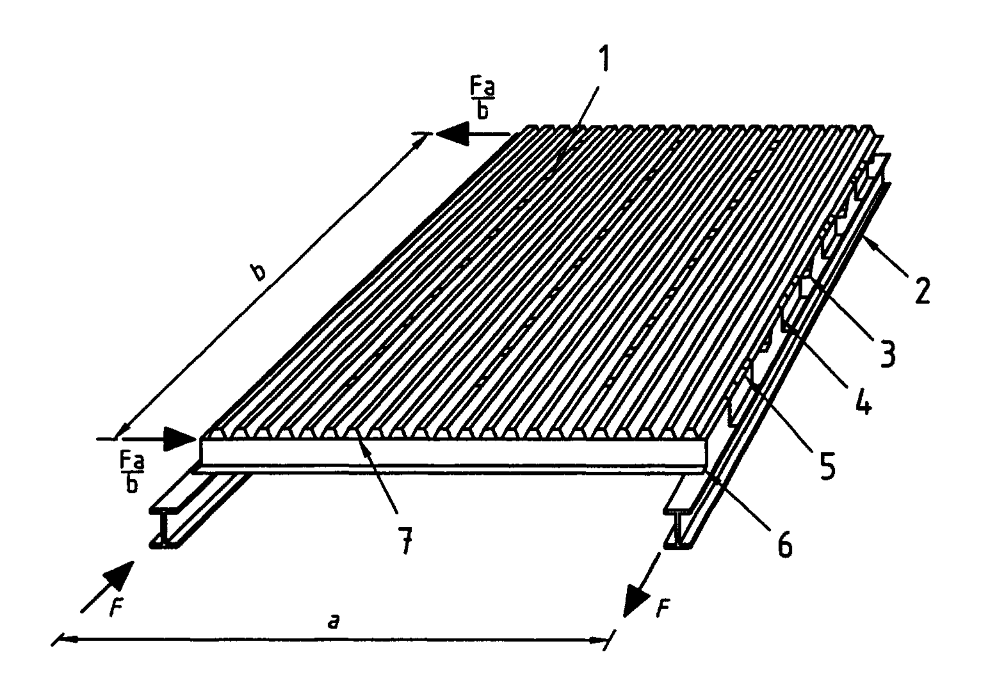
(2) P On doit utiliser le dimensionnement avec collaboration de paroi principalement dans les bâtiments de faible hauteur, ou dans les planchers et façades des bâtiments de grande hauteur.

(2) I Clause sans objet.

(3)P On doit utiliser les diaphragmes avec collaboration de paroi principalement pour résister aux charges de vent, aux charges de neige, et aux autres charges appliquées par l'intermédiaire des plaques. Ils peuvent être également utilisés pour résister à de faibles charges transitoires, comme les charges horizontales résultant d'appareils de levage légers se déplaçant sur des poutres de roulement, mais ils ne peuvent pas être utilisés pour résister à des charges externes permanentes, comme celles d'une installation industrielle.

10.3.4 Diaphragmes constitués de plaques nervurées

(1)P Dans un diaphragme constitué de plaques nervurées, voir figure 10.13, les deux extrémités des plaques doivent être fixées aux profilés porteurs au moyen de vis autotaraudeuses, de clous à scellement, de soudures, de boulons, ou autres dispositifs de fixation d'un type qui ne risque pas de se desserrer en service, de s'arracher, ou de se rompre par cisaillement avant d'entraîner le déchirement des plaques. Tous ces dispositifs doivent être fixés directement au travers des plaques dans le profilé porteur, par exemple au travers des plages des plaques nervurées, à moins que des mesures particulières soient prises pour garantir que les assemblages transmettent effectivement les efforts considérés dans le calcul.



1) Fixations de couture
2) Poutre
3) Panne
4) Connecteur de cisaillement
5) Fixations plaques-connecteurs de cisaillement
6) Panne
7) Fixations plaques-panne

Figure 10.13 : Disposition d'un panneau

(2)P Les emboîtements longitudinaux entre plaques adjacentes doivent être couturés par des rivets, des vis autoperceuses, des soudures, ou autres dispositifs de fixation d'un type qui ne risque pas de se desserrer en service, de s'arracher, ou de se rompre par cisaillement avant d'entraîner le déchirement des plaques. L'espacement de ces fixations ne doit pas être supérieur à 500 mm.

(3)P Les distances entre les fixations et bords ou extrémités des plaques doivent être appropriées de façon à prévenir un déchirement prématuré des plaques.

(4) Des ouvertures de petites dimensions disposées aléatoirement, jusqu'à 3 % de la surface concernée, peuvent être disposées sans calcul particulier, à condition que le nombre total de fixations ne soit pas réduit. Des ouvertures représentant jusqu'à 15 % de la surface concernée peuvent être utilisées si elles sont justifiées par des calculs détaillés. Il convient de diviser les surfaces qui comprennent des ouvertures plus grandes en surfaces plus petites dont chacune assure un plein effet de diaphragme.

(5)P Toutes les plaques qui font aussi partie d'un diaphragme avec collaboration de paroi doivent d'abord être calculées pour leur utilisation principale en flexion. Pour garantir que toute détérioration des plaques apparaîtra en flexion avant que la résistance à l'effet de collaboration de paroi soit altéré, on doit donc vérifier que la contrainte de cisaillement résultant de l'effet de diaphragme n'est pas supérieure à 0,25 f_{yb}/γ_{M1}.

(6)P La résistance au cisaillement d'un diaphragme avec collaboration de paroi doit être basée sur la moindre résistance à l'arrachement des fixations de couture ou des fixations plaques-profilés dans le sens parallèle aux nervures ou, pour les diaphragmes fixés uniquement aux profilés de rive longitudinaux, des fixations plaques-profilés de rive. La résistance au cisaillement calculée pour tout autre type de ruine doit être supérieure à cette valeur minimale d'au moins les valeurs suivantes :

- pour la ruine des fixations plaques-panne sous l'action combinée du cisaillement et du soulèvement dû au vent, de 40 % au minimum ;

- pour tout autre type de ruine, de 25 % au minimum.

10.3.5 Diaphragmes constitués de plateaux en acier

(1) Il convient que les plateaux utilisés pour constituer des diaphragmes soient munis de larges plages raidies.

(2) Il convient d'assembler les plateaux utilisés dans des diaphragmes par des fixations de couture (normalement des rivets aveugles) au travers de l'âme avec un espacement e_s ne dépassant pas 300 mm et à une distance e_u de la plage n'excédant pas 30 mm, voir figure 10.14.

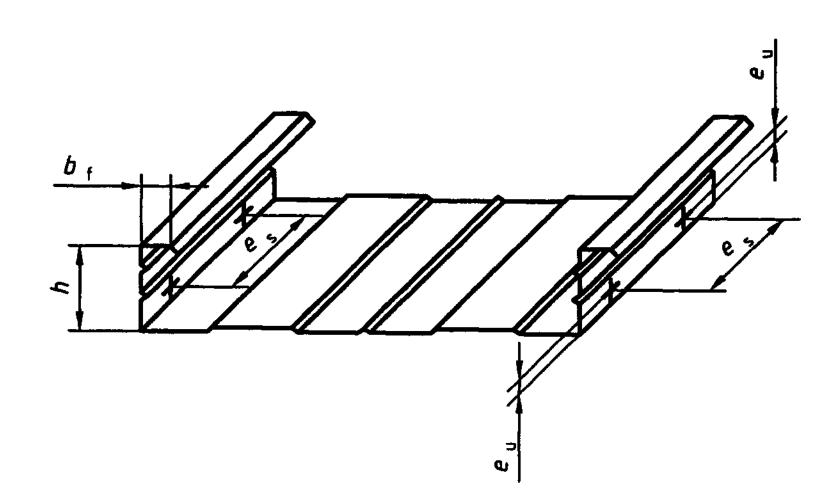


Figure 10.14 : Emplacement des fixations de couture

(3) Une évaluation précise des flèches générées par les fixations peut être réalisée à l'aide d'une méthode similaire à celle utilisée pour les plaques nervurées.

(4) Il convient que le flux de cisaillement $T_{v,Sd}$ résultant des charges de calcul aux états limites ultimes ne soit pas supérieur à $T_{v,Rd}$ donné par :

$$T_{v,Rd} = 6E \sqrt[4]{I_a (t / b_u)^9} \qquad \text{... (10.22)}$$

où :

I_a est le moment d'inertie de la plage par rapport à son propre centre de gravité, voir figure 10.8 ;

b_u est la largeur hors-tout de la plage.

(5) Il convient que le flux de cisaillement $T_{v,ser}$ résultant des charges à l'état limite de service ne soit pas supérieur à $T_{v,Cd}$ donné par :

$$T_{v,Cd} = S_v / 375 \qquad \text{... (10.23)}$$

où :

S_v est la rigidité de cisaillement du diaphragme, par unité de longueur de travée du plateau.

(6) La rigidité de cisaillement S_v par unité de longueur peut être obtenue par :

$$S_v = \frac{\alpha L b_u}{e_s (b - b_u)} \qquad \text{... (10.24)}$$

où :

L est la longueur hors-tout du diaphragme (dans le sens de la portée des plateaux) ;

b est la largeur hors-tout du diaphragme ($b = \Sigma b_u$) ;

α est le coefficient de rigidité.

(7) Le coefficient de rigidité α peut être déduit d'essais conformes aux dispositions de la section 9. Comme alternative, en l'absence de résultats d'essais, α peut être pris, en se plaçant du côté de la sécurité, égal à 2000 N/mm.

10.4 Plaques perforées

(1) Les plaques perforées peuvent être dimensionnées par calcul, à condition que les règles concernant les plaques non perforées soient modifiées par l'utilisation des épaisseurs efficaces données ci-dessous.

NOTE Ces règles de calcul tendent à donner des valeurs offrant une marge de sécurité assez grande. Des solutions plus économiques peuvent être obtenues par le dimensionnement assisté par des essais, voir section 9.

(2) A condition que $0,2 \leq d/a \leq 0,8$, les caractéristiques de section brute peuvent être calculées à l'aide de 3.3.2, mais en remplaçant t par $t_{a,eff}$ obtenue par :

$$t_{a,eff} = 1,18\, t\, (1 - 0,9\, d / a) \qquad \text{... (10.25)}$$

où :

d est le diamètre des perforations ;

a est l'entr'axe des perforations.

(3) A condition que $0,2 \leq d/a \leq 1,0$, les caractéristiques de section efficace peuvent être calculées à l'aide de la section 4, mais en remplaçant t par $t_{b,eff}$ obtenue par :

$$t_{b,eff} = t \sqrt[3]{1,18(1-d/a)} \quad \text{... (10.26)}$$

(4) La résistance d'une seule âme non raidie aux efforts transversaux locaux peut être calculée à l'aide de 5.9, mais en remplaçant t par $t_{c,eff}$ obtenue par :

$$t_{c,eff} = t\,[1 - (d/a)^2\, s_{per}/s_w\,]^{3/2} \quad \text{... (10.27)}$$

où :

s_{per} est la largeur de la partie perforée de l'âme ;

s_w est la largeur totale de l'âme.

Annexe A (informative)
Méthodes d'essais

A.1 Généralités

(1) La présente annexe A donne en tant que base en vue de l'harmonisation des essais futurs, des méthodes d'essais et d'évaluation normalisées appropriées pour un certain nombre d'essais qui sont usuellement nécessaires dans la pratique.

(2) Il est toutefois reconnu que la plupart des données d'essais existantes ont été obtenues à partir d'essais qui diffèrent dans une certaine mesure de ces méthodes.

(3) Afin de pouvoir continuer à utiliser les données existantes, et afin de laisser un délai suffisant pour une transition vers les méthodes harmonisées après une mise en oeuvre expérimentale appropriée, ces méthodes d'essais sont présentées en tant qu'annexe informative, couvrant :

- les essais réalisés sur les plaques nervurées et les plateaux, voir A.2 ;

- les essais réalisés sur les profilés formés à froid, voir A.3 ;

- les essais réalisés sur les structures et parties de structures, voir A.4 ;

- les essais réalisés sur les poutres maintenues en torsion par des plaques, voir A.5 ;

- l'évaluation des résultats d'essais en vue de la détermination des valeurs de calcul, voir A.6.

(3) **C**	Il est rappelé qu'à l'heure actuelle, des dispositions nationales définissent les méthodes d'essais à appliquer pour certains des produits cités ci-avant (voir 9.2 (5)).

A.2 Essais sur plaques nervurées et plateaux

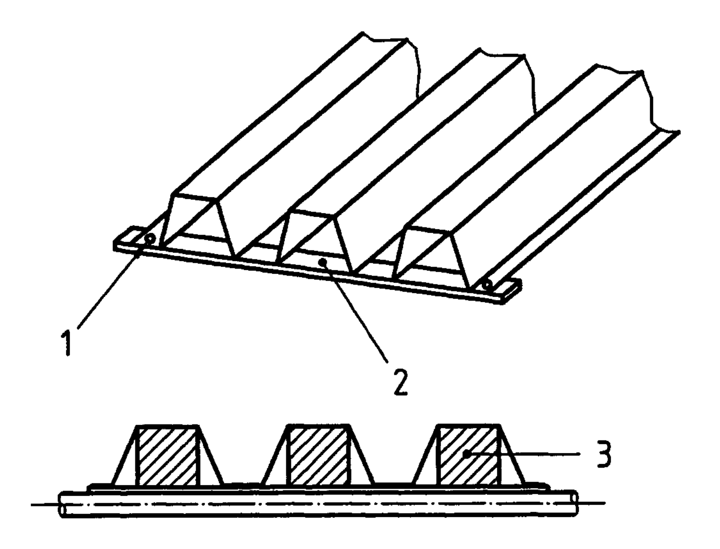
A.2.1 Généralités

(1) Bien que ces méthodes d'essais soient présentées en faisant référence aux plaques nervurées, des méthodes d'essais similaires basées sur les mêmes principes peuvent également être utilisées pour les plateaux.

(2) Le chargement peut être appliqué au moyen de baudruches ou dans un caisson ou par des palonniers en bois ou en acier disposés pour simuler un chargement uniformément réparti.

(2) **I**	Partie de clause sans objet.

(3) Pour empêcher l'évasement des nervures, on peut utiliser sur les éprouvettes des liens transversaux ou d'autres accessoires d'essais appropriés, telles des cales en bois. Quelques exemples sont donnés sur la figure A.1.



1) Rivet ou vis

2) Liens transversaux
(bande métallique)

3) Cales en bois

Figure A.1 : Exemples d'accessoires d'essais appropriés

(4) Pour les essais de soulèvement (dépression), il convient que le montage d'essai simule de façon réaliste le comportement des plaques dans les conditions pratiques. Il convient que le type des assemblages entre les plaques et les appuis soit le même que celui des assemblages devant être utilisé en pratique.

(5) L'utilisation de préférence des supports articulés et à rouleaux, évitant toute influence sur les résultats des essais d'un maintien en torsion au niveau des appuis est préférable pour conférer aux résultats une large gamme de possibilités d'applications.

(6) Il convient de s'assurer que la direction de chargement reste perpendiculaire au plan initial de la plaque tout au long du déroulement de l'essai.

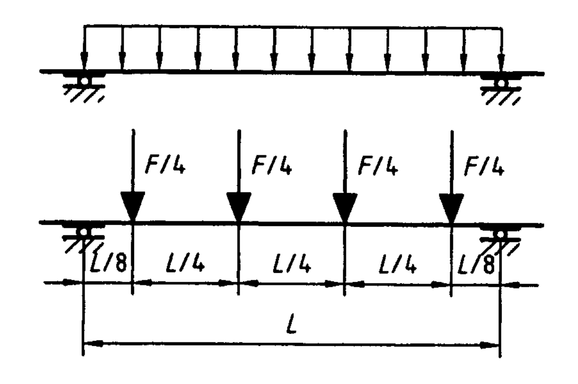
(7) Pour éliminer l'effet des déformations des appuis, il convient de mesurer également les flèches aux deux extrémités de l'éprouvette.

(8) Il convient de prendre comme résultat de l'essai, la valeur maximale du chargement appliqué à l'éprouvette au moment de la ruine, ou immédiatement avant la ruine, selon le cas.

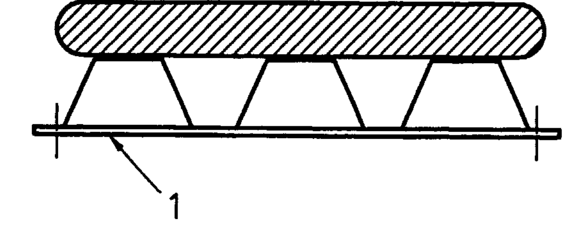
(8) C Selon la procédure de chargement, la charge de ruine peut ne pas être déterminée précisément.

A.2.2 Essai en travée simple

(1) Un montage d'essai équivalent à celui illustré par la figure A.2 peut être utilisé pour déterminer le moment résistant à mi-portée (en l'absence d'effort tranchant) et la rigidité de flexion efficace.

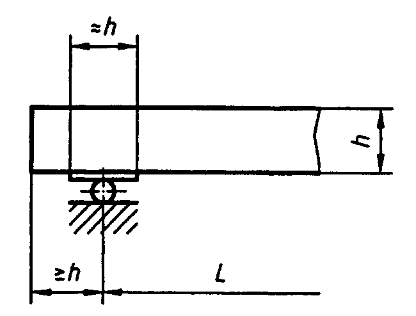


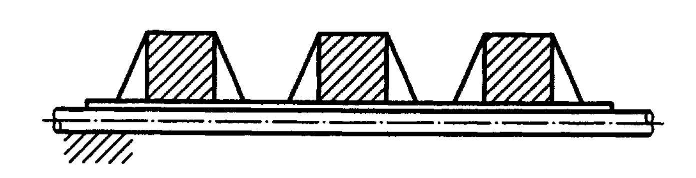
a) Chargement uniformément réparti et exemple d'une alternative avec charges linéaires équivalentes



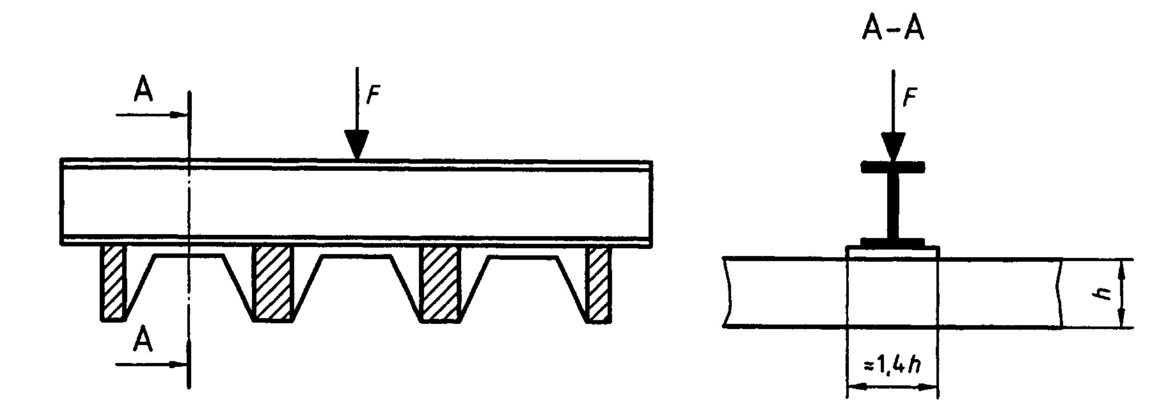
1) Tirant transversal

b) Chargement réparti appliqué par une baudruche (ou dans un caisson)





c) Exemple de dispositions d'appui destinées à empêcher la déformation de la section transversale



d) Exemple de méthode d'application d'une charge linéaire

Figure A.2 : Montage d'essai pour essais en travée simple

(2) Il convient de choisir la portée de telle sorte que les résultats d'essai soient représentatifs du moment résistant de la plaque.

(3) Il convient de déterminer le moment résistant à partir du résultat d'essai.

(4) Il convient de déterminer la rigidité de flexion à partir de la courbe charge-flèche.

A.2.3 Essai en travée double

(1) Le montage d'essai illustré par la figure A.3 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une plaque continue sur deux ou plusieurs travées à des combinaisons de moment et d'effort tranchant au droit des appuis intermédiaires, ainsi que sa résistance à une combinaison de moment et de réaction d'appui pour une largeur d'appui donnée.

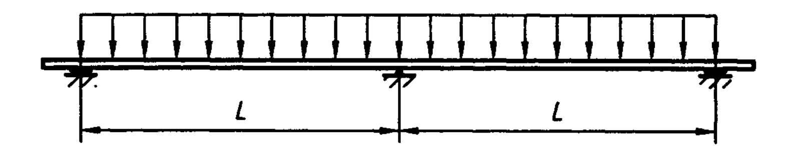


Figure A.3 : Montage d'essai pour essais en travée double

(2) Il convient que le chargement soit, de préférence, uniformément réparti (appliqué à l'aide d'une baudruche ou dans un caisson, par exemple).

(3) Comme alternative, on peut utiliser un nombre quelconque de charges linéaires (transversalement par rapport à la portée), disposées de façon à générer des efforts et moments internes appropriés pour représenter les effets d'un chargement uniformément réparti. Quelques exemples de dispositions appropriées sont illustrés par la figure A.4.

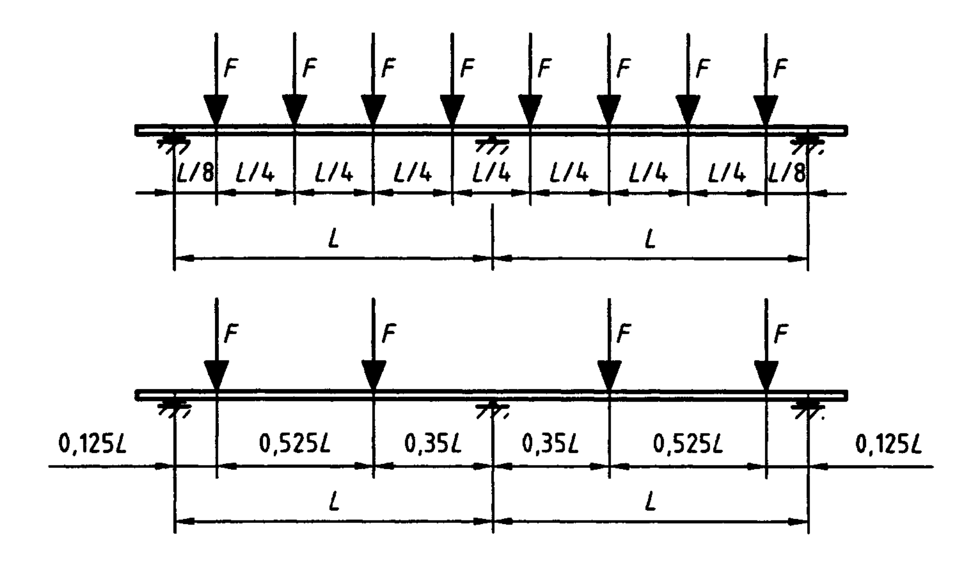
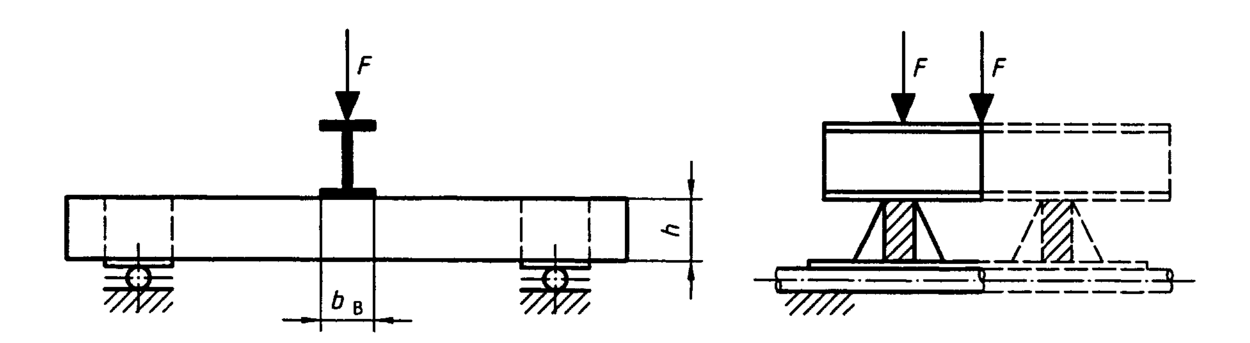


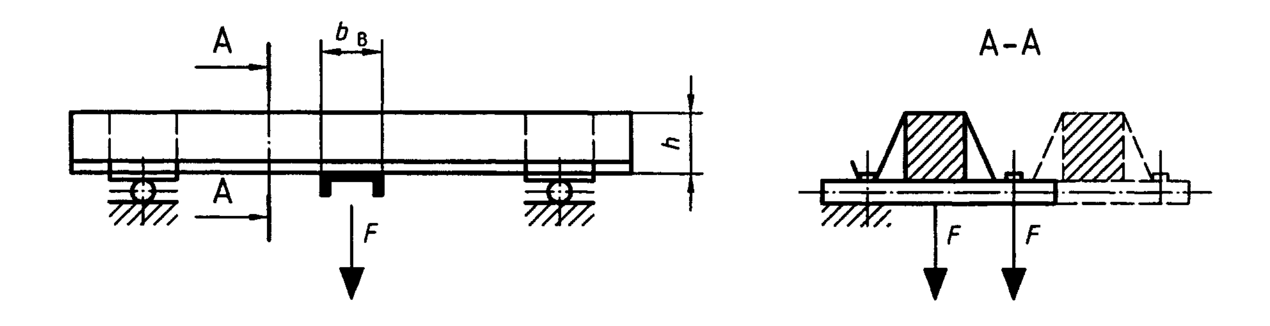
Figure A.4 : Exemples de dispositions appropriées de charges linéaires utilisées à titre d'alternative

A.2.4 Essai d'appui intermédiaire

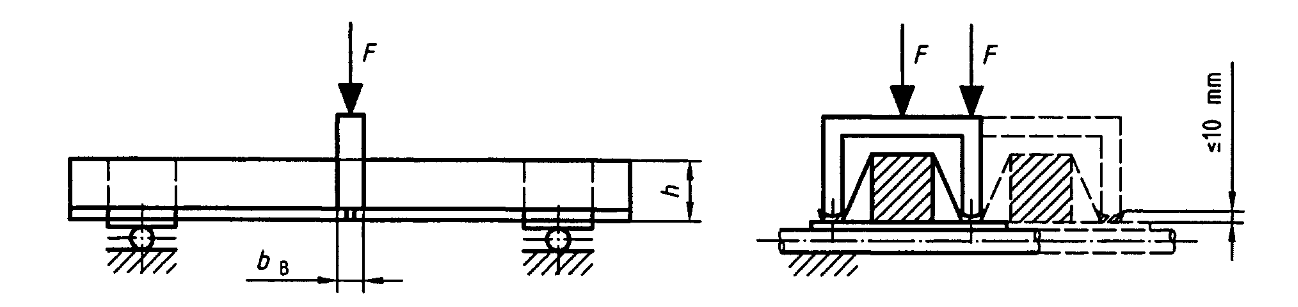
(1) Comme alternative au A.2.3, le montage d'essai illustré par la figure A.5 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une plaque continue sur deux ou plusieurs travées à des combinaisons de moment et de cisaillement au niveau des appuis intermédiaires, ainsi que sa résistance à une combinaison de moment et de réaction d'appui pour une largeur d'appui donnée.



a) Appui intermédiaire soumis à un chargement de gravité



b) Appui intermédiaire soumis à un soulèvement simulé



c) Appui intermédiaire supportant un chargement appliqué sur la semelle tendue

Figure A.5 : Montage d'essai pour essais d'appui intermédiaire

(2) La portée d'essai s utilisée pour représenter la partie de la plaque entre les points d'inflexion de part et d'autre de l'appui intermédiaire, dans une plaque continue sur deux portées égales L, peut être obtenue par :

$$s = 0{,}4\,L \qquad \text{... (A.1)}$$

(3) Si l'on prévoit une redistribution plastique du moment d'appui, il convient de réduire la portée d'essai s pour représenter le rapport approprié du moment d'appui à l'effort tranchant.

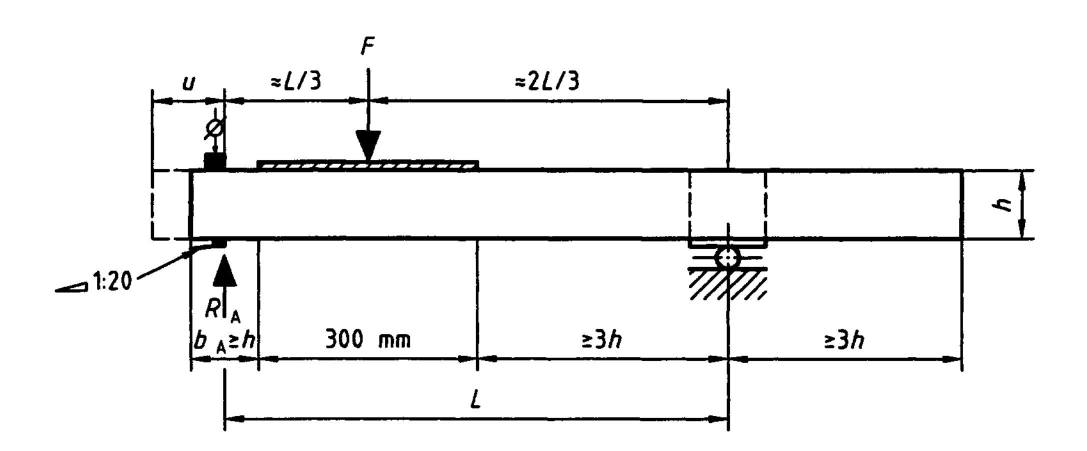
(4) Il convient de choisir la largeur b_B de la poutre utilisée pour appliquer la charge d'essai de façon à représenter la largeur d'appui réelle devant être utilisée en pratique.

(5) Chaque résultat d'essai peut être utilisé pour représenter la résistance à une combinaison de moment fléchissant et de réaction d'appui (ou d'effort tranchant) pour une portée donnée et une largeur d'appui donnée. Pour obtenir des informations concernant l'interaction entre moment fléchissant et réaction d'appui, il convient de réaliser des essais pour plusieurs portées différentes.

A.2.5 Essai d'appui d'extrémité

(1) Le montage d'essai illustré par la figure A.6 peut être utilisé pour déterminer la résistance au cisaillement d'une plaque au niveau d'un appui d'extrémité.

(1) **A**	Pour déterminer la résistance au cisaillement d'une plaque au niveau d'un appui d'extrémité, on peut également réaliser des essais 2 appuis selon A.2.2, avec portée courte.



Légende :
b_A = largeur d'appui
u = longueur entre le bord intérieur de l'appui d'extrémité et l'extrémité de la plaque

Figure A.6 : Montage d'essai pour essais d'appui d'extrémité

(2) Il convient de réaliser des essais séparés pour déterminer la résistance au cisaillement de la plaque pour différentes longueurs u mesurées entre le point de contact au niveau du bord intérieur de l'appui d'extrémité et l'extrémité réelle de la plaque, voir figure A.6.

A.3 Essais sur profilés formés à froid

A.3.1 Généralités

(1) Il convient que chaque échantillon soit semblable à tous égards au composant ou à la structure qu'il représente.

(2) Il convient de préférence que les dispositifs d'appui utilisés pour les essais réalisent des conditions d'extrémité qui reproduisent de manière proche celles résultant des assemblages devant être utilisées en pratique. Lorsque ceci est impossible à réaliser, il convient d'utiliser des conditions d'extrémité moins favorables qui diminuent la capacité de résistance aux charges ou qui augmentent la flexibilité, selon le cas.

(3) Il convient que les dispositifs utilisés pour appliquer les charges d'essai reproduisent la façon dont les charges seraient appliquées en pratique. Il convient de s'assurer qu'ils n'offrent pas une résistance aux déformations transversales de la section transversale, supérieure à celle qui serait disponible dans l'éventualité d'une surcharge en exploitation. Il convient également de s'assurer qu'ils ne concentrent pas les efforts appliqués sur les lignes de plus grande résistance.

(4) Si la combinaison de charges donnée est composée d'efforts s'exerçant sur plus d'une seule ligne d'action, il convient d'appliquer à chacun de ces efforts, chaque accroissement du chargement d'essai, de manière proportionnelle.

(5) A chaque étape du chargement, il convient de mesurer les déplacements ou les déformations au niveau d'un ou plusieurs emplacements principaux sur la structure. Il convient de ne pas effectuer les mesures de déplacements ou de déformations avant la stabilisation complète de la structure suivant un accroissement de charge.

(6) Il convient de considérer que la ruine d'une éprouvette est atteinte dans l'un quelconque des cas suivants :

- à l'effondrement ou à la rupture ;
- au début de la propagation d'une fissure dans une partie vitale de l'éprouvette ;
- si le déplacement est excessif.

(7) Il convient de prendre le résultat de l'essai, égal à la valeur maximale du chargement appliqué à l'éprouvette au moment de la ruine, ou immédiatement avant la ruine, selon le cas.

(8) Il convient que la précision de toutes les mesures soit compatible avec la valeur de la mesure concernée et qu'en aucun cas, elle ne soit moins bonne que ± 1 % de la valeur à déterminer.

(9) Il convient que les mesures de la géométrie de la section transversale de l'éprouvette comprennent :

- les dimensions hors-tout (largeur, hauteur et longueur), avec une précision de ± 1,0 mm ;
- les largeurs des parois de la section transversale, avec une précision de ± 1,0 mm ;
- les rayons des plis, avec une précision de ± 1,0 mm ;
- les inclinaisons des parois, avec une précision de ± 2,0 ° ;
- les angles entre les surfaces planes, avec une précision de ± 2,0 ° ;
- les emplacements et les dimensions des raidisseurs intermédiaires, avec une précision de ± 1,0 mm ;
- l'épaisseur du matériau, avec une précision de ± 0,01 mm.

(10) Il convient également de mesurer tous les autres paramètres appropriés, tels que :

- les emplacements des composants les uns par rapport aux autres ;
- les emplacements des fixations ;
- les valeurs de couples, etc. utilisés pour le serrage des fixations.

A.3.2 Essais de compression sur section complète

A.3.2.1 Essai de compression sur tronçons courts

(1) On peut utiliser des essais de compression sur tronçons courts pour prendre en compte les effets du voilement local dans des sections transversales à parois minces, en déterminant la valeur du rapport $\beta_A = A_{eff}/A_g$ et l'emplacement de l'axe centroïde efficace.

(2) Si le voilement local des parois gouverne la résistance de la section transversale, il convient que l'éprouvette présente une longueur d'au moins 3 fois la largeur de la paroi la plus large.

(3) Il convient que les longueurs des éprouvettes comportant des sections transversales perforées comprennent au moins cinq pas de perforations et soient telles que la coupe de l'éprouvette soit effectuée à mi-distance entre deux perforations.

(4) Dans le cas d'une section transversale munie de raidisseurs de bord ou intermédiaires, il convient de s'assurer que la longueur de l'éprouvette n'est pas inférieure aux longueurs de flambement prévues pour les raidisseurs.

(5) Si la longueur hors-tout de l'éprouvette est supérieure à 20 fois le plus petit rayon de giration de sa section transversale brute i_{min}, il convient de prévoir des maintiens latéraux intermédiaires avec un espacement maximal de $20 i_{min}$.

(6) Avant essai, il convient de vérifier les dimensions de la section transversale de l'éprouvette afin de s'assurer qu'elles se situent dans les limites de tolérances autorisées.

(7) Il convient que les extrémités coupées de l'éprouvette soient planes et perpendiculaires à son axe longitudinal.

(8) Il convient d'appliquer un effort de compression axial à chaque extrémité de l'éprouvette au moyen de plateaux d'une épaisseur d'au moins 30 mm et dépassant d'au moins 10 mm le contour de la section transversale.

(9) Il convient de placer l'éprouvette dans la machine d'essai munie d'un appui sphérique à chaque extrémité. Il convient de réaliser de petites rainures dans les plateaux pour recevoir les appuis sphériques. Il convient d'aligner les appuis sphériques avec l'axe centroïde de la section transversale efficace calculée. Si l'emplacement calculé de ce centre de gravité efficace s'avère incorrect, il peut être ajusté au cours de la série d'essais.

(10) Dans le cas de sections transversales ouvertes, un effet éventuel de déformation élastique de la section à la coupe peut être corrigé.

(11) On peut utiliser des essais de compression sur tronçons courts pour déterminer la résistance à la compression d'une section transversale. Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

- l'épaisseur ;
- le rapport b_p/t ;

(11) **A** - la limite d'élasticité de base f_{yb} ;

- le rapport f_u/f_{yb} ;
- l'emplacement du centre de gravité de la section transversale efficace ;
- les imperfections de forme des parois de la section transversale ;
- la méthode de formage à froid (par exemple l'augmentation de la limité d'élasticité par l'introduction d'une déformation éliminée par la suite).

A.3.2.2 Essai de flambement sur profilés

(1) Des essais de flambement sur profilés peuvent être utilisés pour déterminer la résistance de barres comprimées possédant des sections transversales à parois minces, au flambement global (comprenant le

flambement par flexion, le flambement par torsion et le déversement), ainsi que l'interaction entre le voilement local et le flambement global.

(2) Il convient que la méthode de réalisation de l'essai soit, en général, semblable à celle indiquée en A.3.2.1 pour les essais de compression sur tronçons courts.

(3) On peut utiliser une série d'essais effectués sur des éprouvettes soumises à des charges axiales pour déterminer la courbe de flambement appropriée pour un type donné de section transversale, et une nuance d'acier donnée, fabriquée selon un procédé spécifique. Il convient que les valeurs d'élancement relatif à retenir pour les essais et le nombre minimum d'essais n pour chaque valeur soient tels qu'indiqués dans le tableau A.1.

Tableau A.1 : Valeurs d'élancement relatif et nombres d'essais

$\bar{\lambda}$	0,2	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6	2,0	3,0
n	3	5	5	5	5	5	5	5

(4) Des essais de flambement sur profilés peuvent être également utilisés pour déterminer les effets de l'introduction de maintiens intermédiaires sur la résistance au flambement par torsion d'une barre.

(5) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de prendre en compte les paramètres suivants :

- les paramètres énumérés pour les essais de compression sur tronçons courts en A.3.2.1(11) ;

(5) **A** - les valeurs de l'élancement relatif $\bar{\lambda}$;

- les défauts de rectitude globale ;

- le type de maintien d'extrémité ou de maintien intermédiaire (en flexion, en torsion ou les deux).

A.3.3 Essai de traction sur section complète

(1) Cet essai peut être utilisé pour déterminer la limité d'élasticité moyenne f_{ya} de la section transversale.

(2) Il convient que l'éprouvette ait une longueur d'au moins 5 fois la largeur de la paroi la plus large de la section transversale.

(3) Il convient d'appliquer la charge par l'intermédiaire d'appuis d'extrémités assurant une répartition uniforme des contraintes sur toute la section transversale.

(4) Il convient que la zone de ruine soit située à une distance des appuis d'extrémité au moins égale à la largeur de la paroi la plus large de la section transversale.

A.3.4 Essai de flexion sur section complète

(1) Cet essai peut être utilisé pour déterminer le moment résistant et la capacité de rotation d'une section transversale.

(2) Il convient que l'éprouvette présente une longueur d'au moins 15 fois sa plus grande dimension transversale. Il convient que l'espacement des maintiens latéraux de la semelle comprimée ne soit pas inférieur à l'espacement devant être utilisé en exploitation.

(3) Il convient d'appliquer deux charges ponctuelles à l'éprouvette de façon à créer une longueur soumise à un moment fléchissant uniforme à mi-portée d'au moins 0,2 × (portée) mais sans dépasser 0,33 × (portée). Il convient d'appliquer ces charges à l'aplomb du centre de cisaillement de la section transversale. Si nécessaire, il convient d'empêcher le voilement local de l'éprouvette au droit des points d'application de la charge, afin de s'assurer que la ruine se produit dans la partie centrale de la travée. Il convient de mesurer la flèche aux points de chargement, à mi-portée et aux extrémités de l'éprouvette.

(4) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

- l'épaisseur ;

- le rapport b_p / t ;

(4) **A** - la limite d'élasticité f_y ;

- le rapport f_u / f_y ;

- les différences entre les maintiens utilisés pour l'essai et ceux disponibles en exploitation ;

- les conditions d'appui.

A.4 Essais sur structures et parties de structures

A.4.1 Essai de réception

(1) Cet essai de réception peut être utilisé comme essai non destructif en vue de la confirmation du comportement structural d'une structure ou d'une partie de structure.

(2) Il convient de prendre la charge d'essai pour un essai de réception égale à la somme de :

- 1,0 × (le poids propre réel présent pendant l'essai) ;

- 1,15 × (le reste de la charge permanente) ;

- 1,25 × (les charges variables) ;

mais il est inutile de la prendre supérieure à la moyenne de la charge totale de calcul à l'état limite ultime et de la charge totale de calcul à l'état limite de service pour la combinaison de charge caractéristique (rare).

(3) Avant d'effectuer l'essai de réception, on peut de manière facultative appliquer, puis retirer, un chargement préliminaire de mise en place (ne dépassant pas les valeurs caractéristiques des charges).

(4) Il convient que la structure soit d'abord chargée jusqu'à une valeur égale à la charge caractéristique totale. Sous l'effet de cette charge, il convient de mettre en évidence un comportement essentiellement élastique. Au retrait de cette charge, il convient que la flèche résiduelle ne soit pas supérieure à 20 % du maximum relevé. Si ces critères ne sont pas satisfaits, il convient de répéter cette partie de la procédure d'essai. Au cours de ce cycle de charge répété, il convient que la structure montre un comportement essentiellement linéaire jusqu'à la valeur de charge caractéristique, et que la flèche résiduelle ne soit pas supérieure à 10 % du maximum relevé.

(5) Au cours de l'essai de réception, il convient d'appliquer les charges en un certain nombre de paliers réguliers à intervalles de temps réguliers et de mesurer les flèches principales à chaque étape. Lorsque les flèches montrent une non-linéarité significative, il convient de réduire les accroissements de charge.

(6) A l'obtention de la valeur de charge d'essai de réception, il convient de maintenir la charge pendant une heure au minimum et d'enregistrer les mesures de flèches afin d'établir si la structure fait l'objet d'éventuelles déformations en fonction du temps, comme des déformations de fixations ou des déformations résultant d'un fluage de la couche de zinc.

(7) Il convient de procéder au déchargement par paliers réguliers, en mesurant les flèches à chaque étape.

(8) Il convient que la structure démontre son aptitude à supporter la charge d'essai de réception, et il convient qu'elle présente ni déformation locale significative, ni défauts susceptibles de rendre la structure inutilisable après l'essai.

A.4.2 Essai de résistance

(1) Cet essai de résistance peut être utilisé pour confirmer le niveau de capacité portante calculé d'une structure ou d'une partie de structure. Lorsqu'un certain nombre d'éléments sont à construire selon un même modèle, et qu'un ou plusieurs prototypes ont été soumis à cet essai de résistance et en ont satisfait toutes les prescriptions, les autres peuvent être acceptés sans autre essai à condition qu'ils soient semblables aux prototypes pour tous les aspects pertinents.

(2) Avant de procéder à un essai de résistance, il convient que l'éprouvette satisfasse en premier lieu l'essai de réception détaillé en A.4.1.

(3) Il convient d'augmenter la charge par paliers jusqu'à la valeur de charge d'essai de résistance et de mesurer les flèches principales à chaque étape. Il convient de maintenir la charge d'essai de résistance pendant une heure au minimum et d'enregistrer les mesures de flèches afin d'établir si la structure est sujette au fluage.

(4) Il convient de procéder au déchargement par paliers réguliers, en mesurant les flèches à chaque étape.

(5) Il convient de déterminer la charge totale d'essai F_{str} (comprenant le poids propre) pour un essai de résistance à partir de la charge totale de calcul F_{Sd} spécifiée pour les vérifications par calcul à l'état limite ultime, au moyen de :

$$F_{str} = \mu_F F_{Sd} \qquad \text{... (A.2)}$$

où μ_F représente le coefficient d'ajustement de charge.

(6) Il convient que le coefficient d'ajustement de charge μ_F tienne compte des variations du niveau de capacité portante de la structure, ou de la partie de structure, résultant des effets de la variation de la limite d'élasticité du matériau, du voilement local, du flambement global et de tous autres paramètres ou considérations pertinents.

(7) Lorsqu'une évaluation réaliste du niveau de capacité portante d'une structure, ou d'une partie de structure, peut être effectuée à l'aide des dispositions de la présente partie 1-3 de l'ENV 1993 pour le dimensionnement par calcul, ou par une autre méthode d'analyse reconnue et tenant compte de tous les effets d'instabilité, le coefficient d'ajustement de la charge μ_F peut être pris égal au rapport de la valeur de capacité portante évaluée, basée sur la moyenne des limites d'élasticité de base f_{ym} de la valeur correspondante basée sur la limite d'élasticité de base nominale f_{yb}.

(8) Il convient de déterminer la valeur de f_{ym} à partir de la limite d'élasticité de base mesurée $f_{yb,obs}$ des divers composants de la structure, ou de la partie de structure, en tenant convenablement compte de leur importance relative.

(9) Si des évaluations théoriques réalistes du niveau de capacité portante ne peuvent être effectuées, il convient de prendre le coefficient d'ajustement de charge μ_F égal au coefficient d'ajustement de résistance μ_R défini en A.6.2.

(10) Sous la charge d'essai, il convient que n'apparaissent ni ruine par instabilité ni rupture dans une quelconque partie de l'éprouvette.

(11) Au retrait de la charge d'essai, il convient que la flèche diminue d'au moins 20 %.

A.4.3 Essai de ruine sur prototype

(1) Un essai à la ruine peut être utilisé pour déterminer le mode de ruine réel et le véritable niveau de capacité portante d'une structure ou d'un ensemble. Si le prototype n'est pas destiné à l'emploi, il peut être utilisé de manière facultative pour obtenir ces informations supplémentaires après la réalisation de l'essai de résistance décrit en A.4.2.

(2) Un essai à la ruine peut également être effectué pour déterminer la véritable valeur de calcul du niveau de capacité portante à partir de la charge ultime d'essai. Comme il convient de réaliser les essais de réception et de

résistance de préférence en premier lieu, il convient d'effectuer une estimation de la valeur de calcul du niveau de capacité portante comme base pour ces essais.

(3) Avant d'effectuer un essai à la ruine, il convient que l'éprouvette satisfasse d'abord l'essai de résistance décrit en A.4.2. Sa valeur de calcul estimée du niveau de capacité portante peut alors être corrigée sur la base de son comportement lors de l'essai de résistance.

(4) Au cours d'un essai à la ruine, il convient d'appliquer en premier lieu le chargement par paliers jusqu'à la valeur de charge d'essai de résistance. Il convient de baser les accroissements de charge suivants sur l'examen du tracé des flèches principales.

(5) Il convient de prendre la valeur ultime du niveau de capacité portante égale à la valeur de la charge d'essai atteinte lorsque la structure, ou l'ensemble, est incapable de résister à tout accroissement supplémentaire de la charge.

NOTE A ce point, il est probable qu'une déformation totale permanente se soit produite. Dans certains cas, la déformation totale peut définir la limite d'essai.

A.4.4 Essai d'identification

(1) Un essai d'identification peut être effectué pour :

- vérifier le comportement sous charges par rapport aux modèles de calcul analytique ;

- quantifier les paramètres tirés des modèles de calcul, tels la résistance ou la rigidité des barres ou des joints.

A.5 Essais sur poutres maintenues en torsion par des plaques

A.5.1 Généralités

(1) Ces méthodes d'essais peuvent être utilisées pour les poutres partiellement maintenues contre le déplacement par torsion au moyen de plaques nervurées ou autre élément d'enveloppe approprié.

(2) Ces méthodes peuvent être utilisées pour les pannes, les lisses, les poutres de plancher, ainsi que pour d'autres types similaires de poutres présentant des conditions de maintien appropriées.

A.5.2 Essai d'appui intermédiaire

A.5.2.1 Dispositif d'essai

(1) Le dispositif d'essai illustré par la figure A.7 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une poutre continue à deux ou plusieurs travées aux combinaisons de moment fléchissant et d'effort tranchant au droit des appuis intermédiaires.

(1) **A**	Ce dispositif d’essai peut également être utilisé pour analyser le comportement de la poutre.

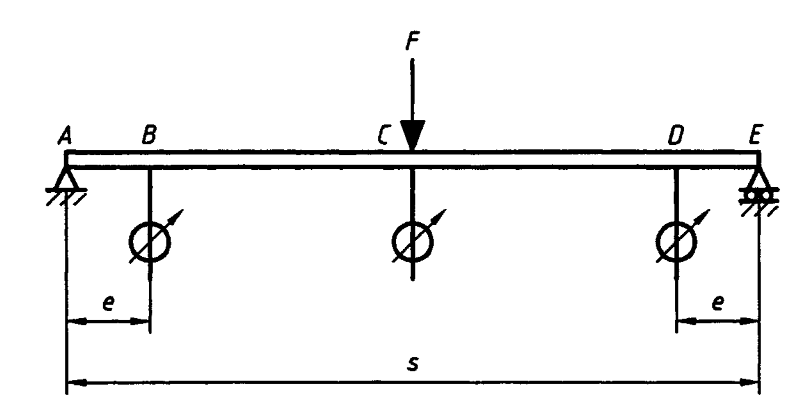


Figure A.7 : Dispositif pour essais d'appui intermédiaire

(2) Il convient que les appuis en A et E soient respectivement des appuis articulés (tournant) et à rouleaux (tournant glissant). Au niveau de ces appuis, on peut empêcher la rotation autour de l'axe longitudinal de la poutre, par exemple au moyen d'échantignoles.

(3) Il convient que la méthode d'application de la charge en C corresponde à celle devant être utilisée en exploitation.

NOTE Dans de nombreux cas, ceci signifie que le déplacement latéral des deux semelles est empêché en C.

(4) Pour éliminer l'influence des déplacements d'appuis, il convient de mesurer les flèches verticales au point d'application de la charge C et en deux points B et D situés à une distance *e* de chaque appui.

(5) Il convient de choisir la portée d'essai *s* de façon à générer des combinaisons de moment fléchissant et d'effort tranchant représentatives de celles susceptibles de se produire en pratique sous l'effet de la charge de calcul pour l'état limite concerné.

(6) Pour les poutres à deux travées de portée *L* soumises à des charges uniformément réparties, il convient de prendre normalement la portée d'essai *s*, égale à 0,4*L*. Cependant, si l'on prévoit une redistribution plastique du moment d'appui, il convient de réduire la portée d'essai *s* afin de représenter le rapport approprié du moment d'appui sur l'effort tranchant.

(6) I Il convient de réaliser des essais pour plusieurs portées différentes pour conférer aux résultats une large gamme de possibilités d'application.

A.5.2.2 Exécution des essais

(1) Outre les règles générales concernant les essais, il convient de tenir compte des aspects particuliers suivants.

(2) Il convient de poursuivre les essais au-delà de la charge maximale, et les mesures des flèches soit jusqu'à ce que la charge appliquée ait été réduite jusqu'à une valeur comprise entre 10 et 15 % de sa valeur maximale, soit jusqu'à ce que la flèche ait atteint une valeur de 6 fois le déplacement élastique maximum.

A.5.2.3 Interprétation des résultats d'essais

(1) Il convient de corriger les résultats d'essai réellement mesurés $R_{obs,i}$ comme indiqué en A.6.2 pour obtenir des valeurs ajustées $R_{adj,i}$ par rapport à la limite d'élasticité de base nominale f_{yb} et l'épaisseur de calcul t de l'acier, voir 3.1-3.

(2) Pour chaque valeur de la portée d'essai *s*, il convient de prendre la réaction d'appui *R* égale à la moyenne des valeurs ajustées de la charge maximale F_{max} pour cette valeur de *s*. Il convient alors de déterminer la valeur correspondante du moment d'appui *M* par :

$$M = (s R) / 4 \quad \text{... (A.3)}$$

(2) **A** Il convient, en général, d'ajouter à la valeur de M indiquée ci-dessus, le moment dû au poids propre.

(3) Il convient de porter sur un graphique les couples de valeurs de *M* et *R* pour chaque valeur de *s* comme indiqué sur la figure A.8. Des couples de valeurs pour les combinaisons intermédiaires de *M* et *R* peuvent alors être déterminées par interpolation linéaire.

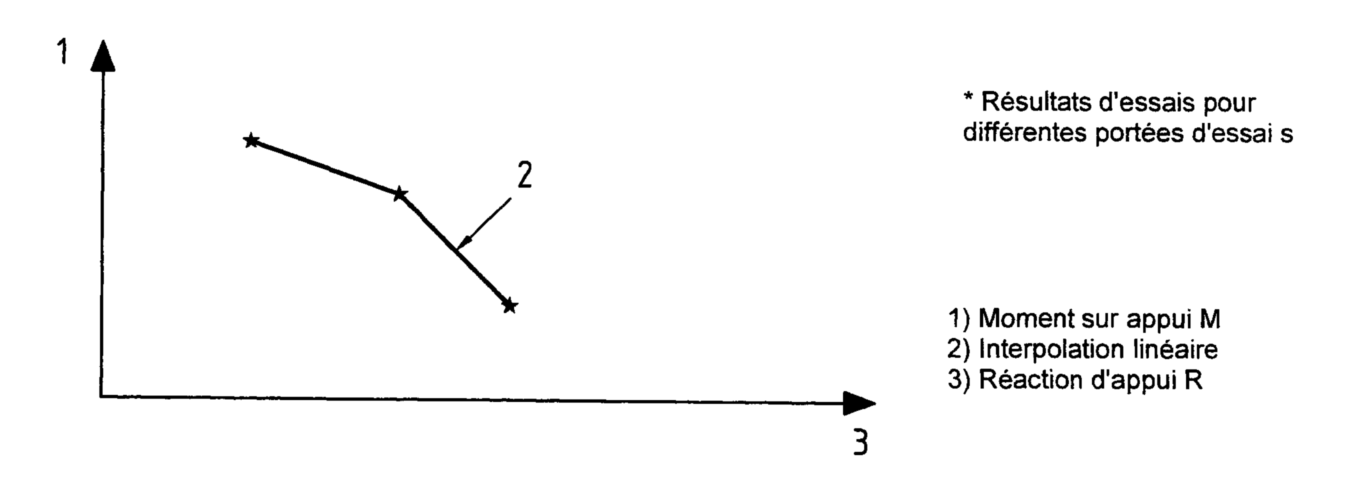


Figure A.8 : Interaction entre moment sur appui et réaction d'appui

(4) Il convient de déterminer la flèche nette au point d'application de la charge C sur la figure A.7, à partir des valeurs brutes mesurées, en soustrayant la moyenne des flèches correspondantes mesurées aux points B et D situés à une distance *e* des points d'appui A et E, voir figure A.7.

(5) Pour chaque essai, il convient de tracer un diagramme donnant la charge appliquée en fonction de la flèche nette correspondante, voir figure A.9. A partir de ce tracé, il convient de déterminer la rotation θ pour une gamme de valeurs de la charge appliquée, par :

$$\theta = \frac{2(\delta_{p\ell} - \delta_{e\ell})}{0,5s - e} \quad \text{... (A.4)}$$

où :

$\delta_{e\ell}$ est la flèche nette pour une charge donnée sur la partie ascendante de la courbe, avant F_{max} ;

$\delta_{p\ell}$ est la flèche nette pour la même charge sur la partie descendante de la courbe, après F_{max} ;

s est la portée d'essai ;

e est la distance entre un point de mesure de la flèche et un appui, voir figure A.7.

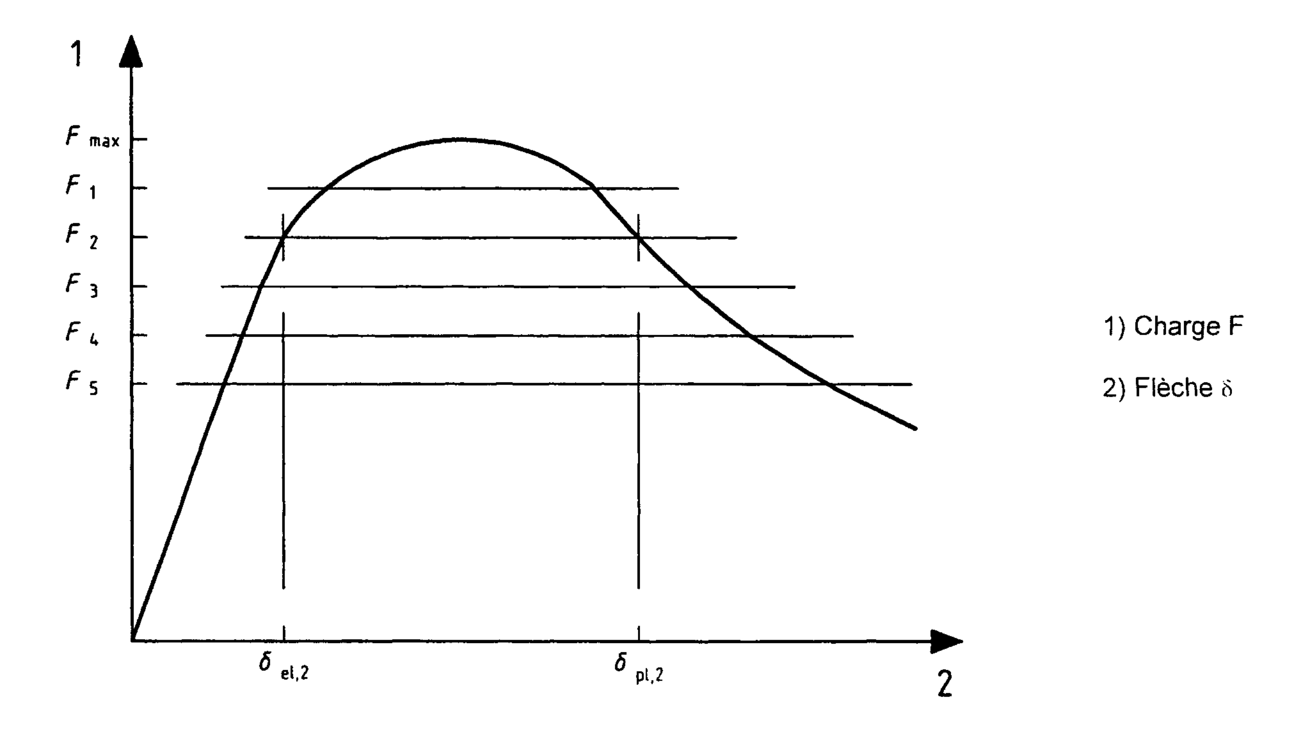


Figure A.9 : Relation entre charge et flèche nette

(6) Il convient de tracer la relation entre M et θ pour chaque essai effectué à une portée d'essai donnée s correspondant à une valeur donnée de portée de poutre L comme indiqué sur la figure A.10. Il convient alors de prendre la caractéristique de calcul M - θ pour le moment résistant de la poutre sur un appui intermédiaire, égale à 0,9 fois la valeur moyenne de M pour tous les essais correspondant à cette valeur de portée de poutre L.

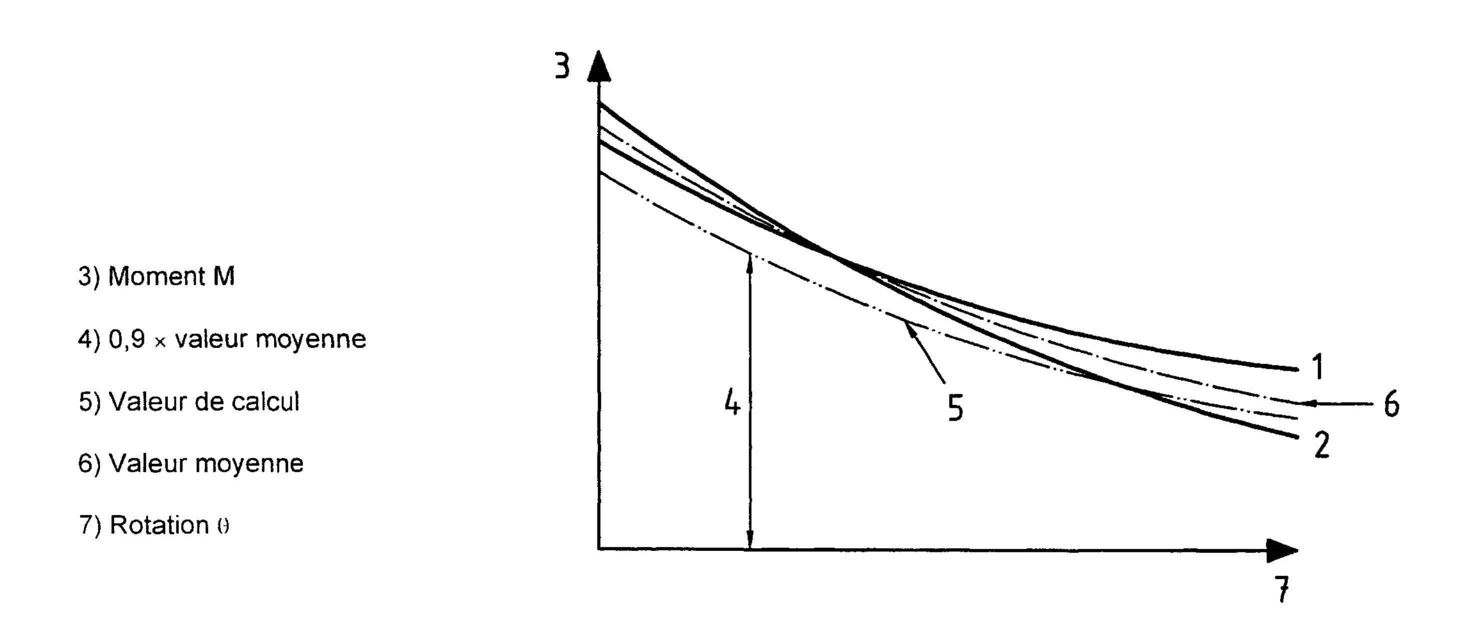
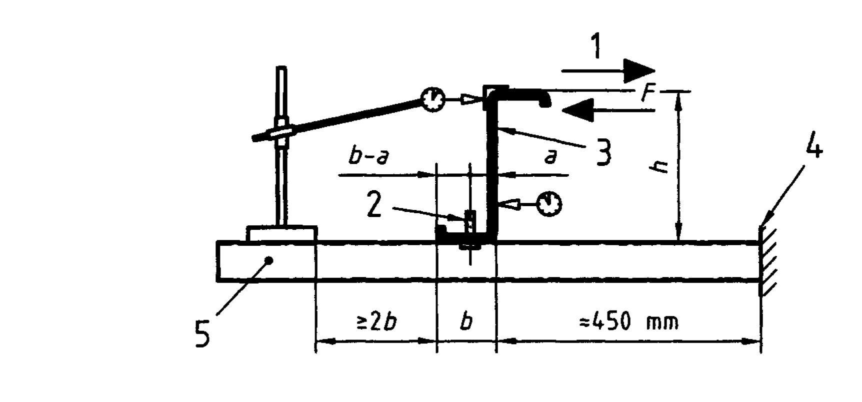


Figure A.10 : Déduction de la caractéristique moment-rotation de calcul

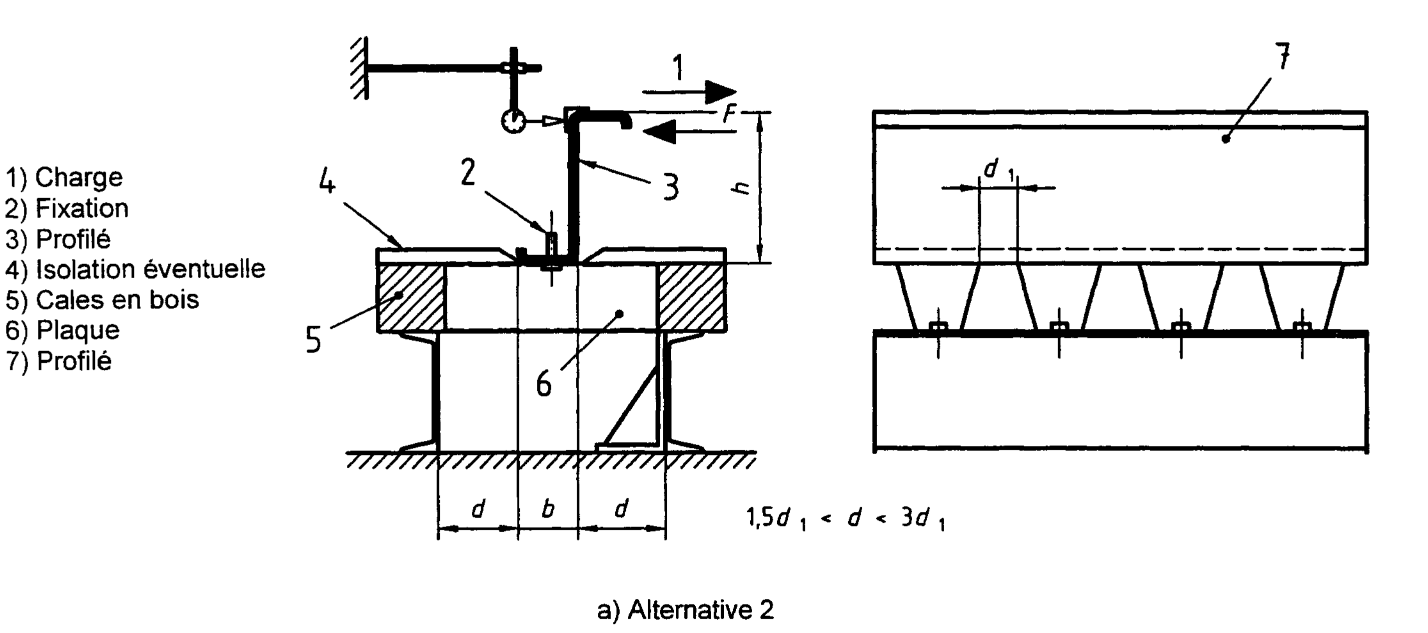
A.5.3 Détermination du maintien en torsion

(1) Le montage d'essai illustré par la figure A.11 peut être utilisé pour déterminer l'importance du maintien en torsion conféré par des plaques convenablement fixées ou par un autre profilé perpendiculaire à la portée de la poutre.

1) Charge
2) Fixation
3) Profilé
4) Appui agrafé
5) Plaque



a) Alternative 1



a) Alternative 2

Figure A.11 : Détermination expérimentale des rigidités élastiques K_A et K_B

(2) Ce montage d'essai couvre deux contributions différentes au maintien total de la façon suivante :

a) La rigidité latérale K_A par unité de longueur correspondant à la rigidité de rotation de l'assemblage entre les plaques et la poutre ;

b) La rigidité latérale K_B par unité de longueur résultant de la déformation de la section transversale de la panne.

(3) Le maintien combiné par unité de longueur peut être déterminé par :

$$(1 / K_A + 1 / K_B) = \delta / F \qquad \text{... (A.5)}$$

où :

F est la charge par unité de longueur de l'éprouvette entraînant une flèche latérale de $h/10$;

h est la hauteur hors-tout de l'éprouvette ;

δ est le déplacement latéral de la semelle supérieure dans le sens de la charge F.

(4) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

- le nombre de fixations par unité de longueur de l'éprouvette ;
- le type des fixations ;
- la rigidité de flexion de la poutre, en relation avec son épaisseur ;
- la rigidité de flexion de la plage inférieure de la plaque, en relation avec son épaisseur ;
- les positions des fixations dans la plage de la plaque ;
- la distance entre les fixations et le centre de rotation de la poutre ;
- la hauteur hors-tout de la panne ;
- la présence éventuelle d'une isolation entre la poutre et la plaque.

(4) **A** - les caractéristiques instantanées et à long terme de l'isolation éventuelle.

A.6 Evaluation des résultats d'essais

A.6.1 Généralités

(1) Il convient de considérer qu'une éprouvette soumise à un essai a atteint la ruine, si les charges d'essai appliquées atteignent leurs valeurs maximales, ou si les déformations globales dépassent les limites spécifiées.

(2) Il convient que les déformations globales des barres satisfassent, en général :

$$\delta \leq L / 50 \quad \text{... (A.6)}$$

$$\phi \leq 1 / 50 \quad \text{... (A.7)}$$

où :

δ est la flèche maximale d'une poutre de portée L ;

ϕ est l'angle de déformation latérale d'une structure.

(3) Pour les essais d'assemblages, ou de composants pour lesquels l'étude des grandes déformations est nécessaire à une évaluation précise (par exemple, pour l'évaluation des caractéristiques moment-rotation d'éclissages), il n'est pas nécessaire de fixer une limite de déformations globales pendant l'essai.

(4) Il convient de prévoir une marge de sécurité appropriée entre un mode de ruine ductile et d'éventuels modes de ruine fragile. Etant donné que les modes de ruine fragile n'apparaissent pas habituellement lors des essais effectués à grande échelle, il convient de réaliser des essais de détail supplémentaires si nécessaire.

NOTE Cela est souvent le cas pour les assemblages.

A.6.2 Correction des résultats d'essais

(1) Il convient de corriger les résultats d'essais de manière appropriée pour tenir compte des variations existant entre les caractéristiques réelles mesurées des éprouvettes et leurs valeurs nominales.

(2) Il convient que la limite d'élasticité de base réelle mesurée $f_{yb,obs}$ ne s'écarte pas de plus de 25 % en plus ou en moins de la limite d'élasticité de base nominale f_{yb}.

(2) I Il convient que la limite d'élasticité de base réelle mesurée $f_{yb,obs}$ soit supérieure ou égale à 75 % de la limite d'élasticité de base minimale f_{yb}.

(3) Il convient que l'épaisseur de la tôle réelle mesurée t_{obs} ne soit pas supérieure à l'épaisseur de calcul t basée sur l'épaisseur de la tôle nominale t_{nom} (voir 3.1.3) de plus de 12 %.

(3) I Il convient que l'épaisseur de la tôle réelle mesurée t_{obs} ne soit pas supérieure à l'épaisseur de la tôle nominale t_{nom} de plus de 12 %.

(4) Il convient de réaliser les ajustements en ce qui concerne les valeurs réelles mesurées de l'épaisseur de la tôle t_{obs} et de la limite d'élasticité de base $f_{yb,obs}$ pour tous les essais, sauf lorsque l'expression de calcul qui utilise les résultats d'essai fait également appel, selon le cas à la valeur réelle mesurée de l'épaisseur ou de la limite d'élasticité de la tôle.

(5) Il convient de déterminer la valeur corrigée $R_{adj,i}$ du résultat d'essai pour l'essai i à partir du résultat d'essai réel mesuré $R_{obs,i}$ au moyen de :

$$R_{adj,i} = R_{obs,i} / \mu_R \qquad \text{... (A.8)}$$

où μ_R représente le coefficient d'ajustement de résistance donné par :

$$\mu_R = \left[\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}}\right]^{\alpha} \left[\frac{t_{obs}}{t}\right]^{\beta} \qquad \text{... (A.9)}$$

(5) I

$$\mu_R = \mu_{R0} \left[\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}}\right]^{\alpha} \left[\frac{t_{obs}}{t}\right]^{\beta} \quad \text{pour les plaques nervurées et les plateaux} \qquad \text{... (A.9 a)}$$

$$\mu_R = \left[\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}}\right]^{\alpha} \left[\frac{t_{obs}}{t}\right]^{\beta} \quad \text{dans les autres cas} \qquad \text{.... (A.9 b)}$$

(6) Il convient de déterminer l'exposant α à utiliser dans l'expression (A.9) de la façon suivante :

- si $f_{yb,obs} \leq f_{yb}$: $\alpha = 0$
- si $f_{yb,obs} > f_{yb}$:
  - en général $\alpha = 1$
  - pour les plaques nervurées (ou les plateaux) pour lesquelles les parois comprimées présentent des rapports b_p/t si élevés que le voilement local constitue clairement le mode de ruine : $\alpha = 0,5$

(6) I Il convient de déterminer l'exposant α à utiliser dans les expressions (A.9a) et (A.9b) de la façon suivante :

- si $f_{yb,obs} \leq f_{yb}$: $\alpha = 0$
- si $f_{yb,obs} > f_{yb}$: $\alpha = 1$

(7) Il convient de déterminer l'exposant β à utiliser dans l'expression (A.9) de la façon suivante :

- si $t_{obs} \leq t$: $\beta = 1$
- si $t_{obs} > t$:

- pour les essais sur des plaques nervurées ou plateaux : $\beta = 2$

(7) I pour les essais sur des plaques nervurées ou plateaux :

$$-si \quad 1{,}06 < \frac{t_{obs}}{t_{nom}} \leq 1{,}12 \quad : \quad \mu_{Ro} = 1; \quad \beta = 2;$$

$$-si \quad \frac{t_{obs}}{t_{nom}} \leq 1{,}06 \quad : \quad \mu_{Ro} = \frac{1}{0{,}96}; \quad \beta = 1.$$

- pour les essais sur des profilés, structures ou parties de structures :
  - si $b_p/t \leq (b_p/t)_{lim}$: $\beta = 1$
  - si $b_p/t > 1{,}5\,(b_p/t)_{lim}$: $\beta = 2$
  - si $(b_p/t)_{lim} < b_p/t < 1{,}5\,(b_p/t)_{lim}$: obtenir β par interpolation linéaire.

où le rapport largeur-épaisseur de limitation $(b_p/t)_{lim}$ est donné par :

$$(b_p/t)_{lim} = 0{,}64\sqrt{\frac{Ek_\sigma}{f_{yb}}} \times \sqrt{\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} \cong 19{,}1\varepsilon\sqrt{k_\sigma} \times \sqrt{\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} \qquad \text{(A.10)}$$

où :

b_p est la largeur de référence d'une paroi ;

k_σ est le coefficient de voilement approprié pris dans le tableau 4.1 ou 4.2 ;

$\sigma_{com,Ed}$ est la plus grande contrainte de compression calculée dans cet élément, lorsque la résistance de la section transversale est atteinte.

A.6.3 Valeurs caractéristiques

A.6.3.1 Généralités

(1) Les valeurs caractéristiques peuvent être déterminées statistiquement, à condition que l'on dispose d'au minimum 4 résultats d'essais.

NOTE Un nombre plus élevé est en général préférable, en particulier si la dispersion est relativement importante.

(2) Si l'on dispose de 3 résultats d'essais ou moins, on peut utiliser la méthode donnée en A.6.3.3.

(3) Il convient de déterminer la valeur caractéristique minimale en suivant les dispositions suivantes. Si la valeur caractéristique maximale ou la valeur caractéristique moyenne sont prescrites, il convient de les déterminer au moyen d'adaptations appropriées des dispositions données pour la valeur caractéristique minimale.

(4) La valeur caractéristique d'une résistance R_k déterminée sur la base d'un minimum de 4 essais peut être obtenue par :

$$R_k = R_m - ks \qquad \text{... (A.11)}$$

où :

s est l'écart-type ;

k est le coefficient approprié pris dans le tableau A.2 ;

R_m est la valeur moyenne des résultats d'essai corrigés R_{adj}.

Tableau A.2 : Valeurs du coefficient *k*

n	4	5	6	8	10	20	30	∞
k	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

(5) L'écart-type s peut être déterminé par :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{adj,i} - R_m\right)^2}{n-1}} \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{adj,i}\right)^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} R_{adj,i}\right)^2}{n-1}} \qquad \text{... (A.12)}$$

où :

$R_{adj,i}$ est le résultat d'essai corrigé pour l'essai i ;

n est le nombre d'essais.

A.6.3.2 Valeurs caractéristiques pour des familles d'essais

(1) Une série d'essais effectués sur un certain nombre de structures, parties de structures, profilés, plaques ou autres composants par ailleurs similaires, dans lesquels on fait varier un ou plusieurs paramètres, peut être traitée comme une seule famille d'essais, à condition que ces éléments présentent tous le même mode de ruine. Les paramètres que l'on fait varier peuvent comprendre les dimensions de section transversale, les portées, les épaisseurs et les résistances des matériaux.

(2) Les résistances caractéristiques des éléments d'une famille donnée peuvent être déterminées à partir d'une formule de calcul adaptée mettant en relation les résultats d'essais et la totalité des paramètres appropriés. Cette expression de calcul peut être soit basée sur les équations de mécanique des structures appropriées, soit déterminée de façon empirique.

(3) Il convient de modifier la formule de calcul pour évaluer la résistance moyenne mesurée aussi précisément que possible, en ajustant les coefficients de façon à optimiser la corrélation.

NOTE Des informations concernant cette méthode sont données dans l'annexe Z [3] de l'ENV 1993-1-1.

(4) Afin de calculer l'écart-type s, il convient en premier lieu de normer chaque résultat d'essai en le divisant par la valeur correspondante évaluée par la formule de calcul. Si la formule de calcul a été modifiée comme spécifié en (3), la valeur moyenne des résultats d'essai normés sera l'unité. Il convient de prendre le nombre d'essais n égal au nombre total d'essais effectués dans la famille.

---

[3] Cette annexe est en préparation.

(5) Pour une famille d'au moins quatre essais, il convient ensuite d'obtenir la résistance caractéristique R_k au moyen de l'expression (A.11) en prenant R_m égale à la valeur évaluée par la formule de calcul, et en utilisant la valeur de k prise dans le tableau A.2 correspondant à une valeur de n égale au nombre total d'essais effectués dans la famille.

A.6.3.3 Valeurs caractéristiques basées sur un nombre d'essais réduit

(1) Si l'on effectue un seul essai, il convient alors de déterminer la résistance spécifique R_k correspondant à cet essai à partir du résultat d'essai corrigé R_{adj} au moyen de :

$$R_k = 0{,}9\, \eta_k\, R_{adj} \qquad \text{... (A.13)}$$

où il convient de prendre la valeur de η_k de la façon suivante selon le mode de ruine :

- plastification : $\eta_k = 0{,}9$;
- déformation globale : $\eta_k = 0{,}9$;
- voilement local : $\eta_k = 0{,}8$;
- instabilité globale : $\eta_k = 0{,}7$.

(1) **I** $R_k = 0{,}85\, \eta_k\, R_{adj}$ ... (A.13)

où il convient de prendre la valeur de η_k de la façon suivante selon le mode de ruine :

- plastification, déformation globale ou voilement local : $\eta_k = 1$;
- instabilité globale: $\eta_k = 0{,}75$.

(2) Pour une famille de deux ou trois essais, à condition que chaque résultat d'essai corrigé $R_{adj,i}$ se situe dans une marge de ± 10 % autour de la valeur moyenne R_m des résultats corrigés, il convient de déterminer la résistance caractéristique R_k par :

$$R_k = \eta_k\, R_m \qquad \text{... (A.14)}$$

(2) **I** $R_k = 0{,}9\, \eta_k\, R_m$ ... (A.14)

(3) Les valeurs caractéristiques des caractéristiques de rigidité (telles la rigidité de flexion ou de rotation) peuvent être prises égales à la valeur moyenne d'au moins deux essais, à condition que chaque résultat d'essai ne s'écarte pas de plus de 10 % de la valeur moyenne.

(3) **A** Dans le cas ou l'on dispose d'un seul résultat d'essai, les valeurs caractéristiques des caractéristiques de rigidité peuvent être prises égales à 0,95 fois la valeur observée si la caractéristique de rigidité à un effet favorable et à 1,05 fois la valeur observée si elle a un effet défavorable.

A.6.4 Valeurs de calcul

(1) Il convient de déduire la valeur de calcul d'une résistance R_d de la valeur caractéristique correspondante R_k déterminée par des essais, au moyen de :

$$R_d = R_k / \gamma_M / \gamma_{sys} \qquad \text{... (A.15)}$$

où :

γ_M est le coefficient partiel pour la résistance ;

γ_{sys} est le coefficient partiel pour les différences de comportement entre les conditions d'essai et les conditions réelles.

(2) Pour une famille d'au moins quatre essais, la valeur de γ_M peut être déterminée au moyen de méthodes statistiques.

NOTE Des informations concernant une méthode appropriée sont données dans l'annexe Z [4] de l'ENV 1993-1-1.

(2) **A**	NOTE : L'annexe Z de l'ENV 1993-1-1 n'étant pas disponible, il convient pour le moment, en l'absence de méthode unifiée, de se reporter au A.6.4(3).

(3) Comme alternative, γ_M peut être pris égal à la valeur appropriée de γ_M pour le dimensionnement par calcul donnée dans la section 2 ou dans la section 9 de la présente partie 1-3.

(4) Il convient que la valeur appropriée de γ_{sys} fasse l'objet d'un accord entre le client, le concepteur, l'entité chargée des essais et l'autorité compétente.

(5) Pour les plaques ainsi que pour d'autres méthodes d'essais normalisées bien définies (y compris les essais de compression sur tronçons courts A.3.2.1, les essais de traction A.3.3 et les essais de flexion A.3.4), γ_{sys} peut être pris égal à 1,0.

(5) **A**	Pour les essais sur pannes conformes à l'article A.5, on peut prendre également $\gamma_{sys} = 1,0$

(6) Pour d'autres types d'essais dans lesquels il se peut que d'éventuels phénomènes d'instabilité, ou modes de comportement, de structures ou de composants de structures ne soient pas suffisamment couverts par les essais, il convient d'évaluer la valeur de γ_{sys} en tenant compte des conditions réelles d'essai, afin de garantir la fiabilité nécessaire.

A.6.5 Aptitude au service

(1) Il convient que les dispositions de la section 7 soient satisfaites.

[4] Cette annexe est en préparation.